

一种测斜机器人正反测量技术的研究

马柯

(上海米度测控科技有限公司, 上海 201203)

摘要:仿生式测斜机器人是一项替代人工测斜的自动化监测技术,因其无人工误差、测量频率高、时效性好等特点,受到了广泛的关注。正反测量技术是测斜机器人的关键技术之一。该文研究一种高精度的正反测量技术,利用步进电机驱动技术和齿轮传动技术实现了测斜机器人的旋转机构设计,具有定位精度高、抗疲劳性强、产品化程度高等特点。在此基础上,该文详细研究了正反测量在测斜技术中的应用,揭示了其对测斜精度和可靠性的影响。该文弥补了测斜技术中正反测量在理论和技术层面的研究空白,对测斜技术的实际应用以及行业规范的标准化作具有指导意义。

关键词:测斜;正反测量;精密仪器;深层水平位移

中图分类号:TH-39

文章编号:1000-0682(2024)04-0057-07

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.04.012

Research on automatic double reading technology of inclinometer robot

MA Ke

(Shanghai Medo Monitoring Technology Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: Bionic inclinometer robot is an automatic monitoring technology that replaces manual inclinometer. Due to its characteristics of no manual error, high measurement frequency and good timeliness, it has been widely concerned. Automatic double reading technology is one of the key technologies of inclinometer robot. In this paper, a high precision automatic double reading technology was studied, and the rotary mechanism for inclinometer robot was designed and realized by using stepper motor drive technology and gear transmission technology. Based on this, the application of double reading technology was studied in detail, and its influence on the accuracy and reliability of inclinometer was revealed. This paper filled the research gap both in theory and technology of automatic double reading in the inclinometer technique, and had guiding significance for the practical application of inclinometer technology and the standardization of industry specifications.

Keywords: inclinometer; double reading; precision instrument; deep horizontal displacement

0 引言

仿生式测斜机器人是一项替代人工测斜的自动化监测技术^[1-6]。它的设计思路是模拟人工测量的行为,利用驱动电机带动牵引绳代替人工实现对测斜传感器的提升和下放,同时通过高精度定位技术来准确控制测斜传感器的测量位置。相对固定式测斜仪^[7-8]或者阵列式测斜仪^[9],测斜机器人因其测

量精度高、符合规范要求、经济性好等特点,受到了广泛的关注^[10-12]。在实际应用中,在测斜仪完成正向测量以后,还需要将测斜仪旋转180°后进行反向测量。该实施方法称之为正反测量,也是行业规范的核心要求之一^[4,13]。测斜技术中的正反测量被认为有利于消除系统误差,提高数据的准确性,并且通过正反测量常数进行数据的可靠性检验。

正反测量技术是测斜机器人的关键技术之一。但是,迄今为止,很少有文章报道关于测斜技术中正反测量的研究^[4-6]。在2018年和2021年,Paolo Allasia团队^[4]和王启飞团队^[5]分别研究了一种仿生式测斜系统。该测斜系统采用了直流电机代替人

收稿日期:2024-03-16

第一作者:马柯(1990—),男,硕士,中级工程师,研究方向为精密仪器和自动化机器人技术。E-mail:ke.ma@shmedo.cn

力牵引传统的线缆式测斜仪,并设计了一个水平旋转机构实现了测斜仪的 180° 旋转。但是该水平旋转机构采用皮带轮传动,存在传动精度低、抗疲劳性差等缺点,长期工作中会发生松弛现象,需要定期校准。在 2022 年,白昫提出了一种基于无线测斜仪的仿生式测斜系统^[6]。该系统采用钢丝绳牵引无线测斜仪的解决方案,解决了由于线缆式测斜仪而引起的诸多问题。但是,该文章并没有详细研究和探讨正反测量技术,不论是在理论层面还是实际应用层面。

因此,该文研究了一种高精度的正反测量技术,利用步进电机驱动技术和齿轮传动技术实现了测斜机器人的旋转机构设计,具有定位精度高、抗疲劳性强、产品化程度高等特点,具有非常广阔的应用前景。在此基础上,该文详细研究了正反测量在测斜技术中的应用,揭示了其对测斜精度和可靠性的影响。该文弥补了测斜技术中正反测量在理论和技术层面的研究空白,对测斜技术的实际应用以及行业规范的标准化具有指导意义。

1 技术原理与系统组成

图 1 出示了测斜机器人的系统拓扑图,主要由执行机构、旋转机构和无线测斜仪 3 个部分组成。执行机构一般由采集控制器、电机驱动器、驱动电机、绞盘结构、制动装置和高精度定位装置组成,主要实现对测斜仪的提升和下放,数据采集并上传至云平台^[6]。绞盘结构上绕有牵引绳与无线测斜仪连接。制动装置是防止测斜仪在系统失电时因为自重而自由落体。高精度定位装置用于实时记录牵引绳运行的距离,确定测斜仪所在的测量位置。采集控制器用于控制电机运动、与无线测斜仪通讯,以及将数据进行校验上传至云平台。

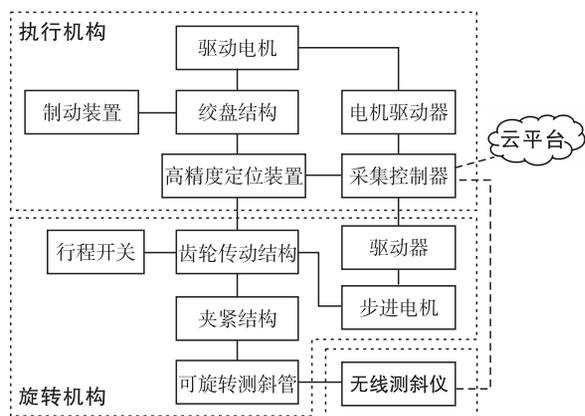


图 1 测斜机器人的系统拓扑图

旋转机构主要实现对测斜仪的旋转定位,完成

180° 的转向测量。它的设计思路是利用将测斜仪放置到一根可旋转的测斜管里,使该测斜管旋转从而完成测斜仪的 180° 转向。设备安装于现场的土体测斜管上方,将可旋转测斜管与其对齐,从而实现测斜仪的正反测量。旋转机构主要由驱动部分、传动部分、夹紧结构和行程开关组成,其技术原理图如图 2 所示。驱动部分主要是高精度步进电机和配套驱动器,用于带动传动部分旋转。

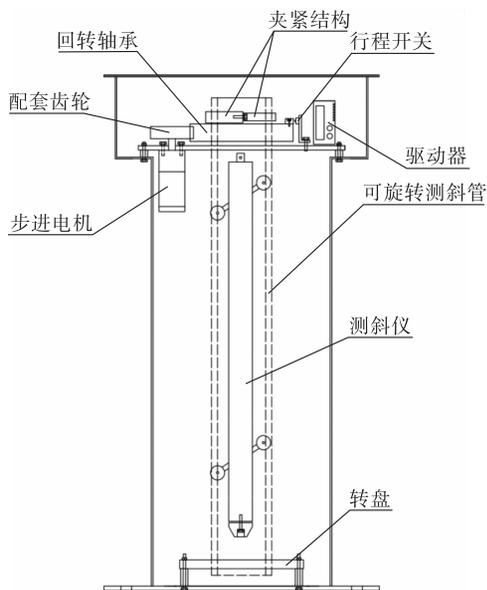


图 2 旋转机构技术原理图

齿轮传动部分采用外齿回转轴承和小齿轮的减速传动技术方案,在增加输出扭矩的同时提高其定位精度。回转轴承的内径需要大于可旋转测斜管的外径,使得测斜管可以穿过其中。通过夹紧结构将可旋转测斜管固定于回转轴承上。可旋转测斜管的底部穿过一个转盘,起到径向的支撑作用。行程开关用于确定测斜仪旋转的零点位置,提高旋转定位精度,避免出现误差的累积。基于工程应用的技术要求,旋转机构安装于现场的土体测斜管上方,将可旋转测斜管与其对齐,可以得出旋转机构的定位精度技术指标,因满足公式(1)要求:

$$\begin{aligned} & \text{零点定位最大误差} + \text{旋转定位最大误差} \\ & < \text{允许定位误差} \end{aligned} \quad (1)$$

允许定位误差可以通过可旋转测斜管和土体测斜管的结构几何关系中求得,其示意图如图 3 所示。当上下测斜管无错位对齐时,如图 3(a) 所示,测斜仪可以顺畅地在上下测斜管内通行,测斜管的导槽宽度略大于测斜仪的导轮宽度。由于旋转误差的存在,当可旋转测斜管与土体测斜管的错位角度过大,可通过的导槽宽度小于测斜仪的导轮宽度时,会出

现测斜仪的下放卡阻现象。当可通过的导槽宽度等于测斜仪的导轮宽度时,此时可旋转测斜管相对于无错位对齐时的旋转角度就是允许定位误差,即允许最小的错位角度。根据余弦公式,其计算方法如公式(2)所示:

$$\cos\theta = \frac{2L^2 - (D-d)^2}{2L^2} \quad (2)$$

其中: D 为测斜管的导槽宽度; d 为导轮的宽度; L 为测斜管圆心到导槽的距离(mm); θ 为允许定位误差($^{\circ}$)。

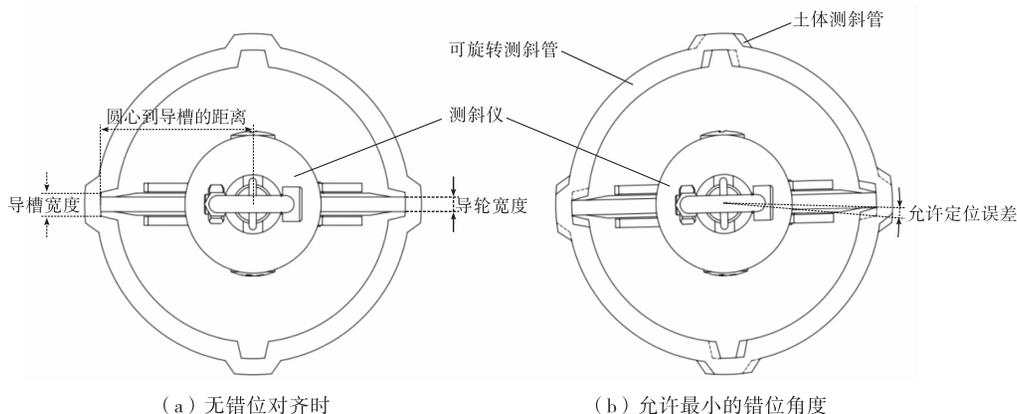


图3 上下测斜管对齐示意图

2 实验部分

2.1 样品制备

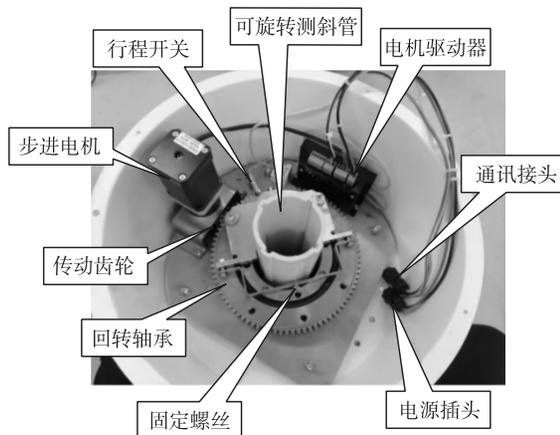
图4分别展示了仪器实物图和现场安装图。测斜机器人主要由执行机构、旋转机构和无线测斜仪三个部分组成^[6],如图4(a)所示。执行机构内置绞盘结构通过钢丝绳牵引无线测斜仪进行提升和下放。旋转机构实现对测斜仪的 180° 旋转控制。图4(b)出示了旋转机构的内部实物图。驱动部分选用带有行星减速器,减速比为10的42步进电机和配套驱动器,步距角为 1.8° ,电机脉冲数细分为1600。传动部分选用小齿轮和外齿回转轴承的传动方案。回转轴承的型号011.10.120,硬度HRC60,具有优异的耐磨性,内径80mm足够穿过一个测斜管,外径齿轮数85个。小齿轮设计齿数为25个,因此该齿轮传动的传动比为3.4。

可旋转测斜管通过夹紧结构固定于回转轴承上,随之做旋转运动。可旋转测斜管采用外径70的U型测斜管,ABS材质。导槽宽度 D 为3.8mm,测斜管圆心到导槽的距离 L 为31.3mm,测斜仪导轮宽度 d 为3.0mm,根据公式(2)得到其允许的定位误差 θ 约为 $\pm 1.5^{\circ}$ 。所设计的旋转机构对于可旋转测斜管的定位控制精度为 0.053° (定位精度等于步距角除以减速比),完全符合技术要求。为了确保可旋转测斜管的固定可靠,通过固定螺丝将其与夹紧板紧固。行程开关采用了非接触式的有源磁开关M9N-D,用于确定旋转机构的零点位置。旋转机

构的整体尺寸为 $\Phi 320\text{ mm} \times 770\text{ mm}$,立柱式封装外壳采用不锈钢材质的中空圆筒造型设计,表面进行烤漆处理防腐防锈。旋转机构安装于现场的测斜管上并与执行机构通过螺栓固定,其现场的安装图如图4(c)所示。



(a) 测斜机器人实物图



(b) 旋转机构实物图



(c) 现场安装图

图4 实物图

2.2 定位精度测试

2.2.1 实验环境

测试平台主要由高精度磁性编码器、配套磁铁和编码器显示器组成。配套磁铁通过支架安装于回转轴承上,随着机构的旋转而运动。磁性编码器通过支架安装于配套磁铁的上方,距离 2 ~ 3 mm 的位置。磁性编码器选用的是 2500 线束规格,通过编码器显示器实时记录 AB 相的输出脉冲,可以实现磁铁每转一圈,磁性编码器输出 10 000 个脉冲数。一个脉冲数代表 0.036° 的旋转角度,其精度满足旋转定位误差测试的技术要求。

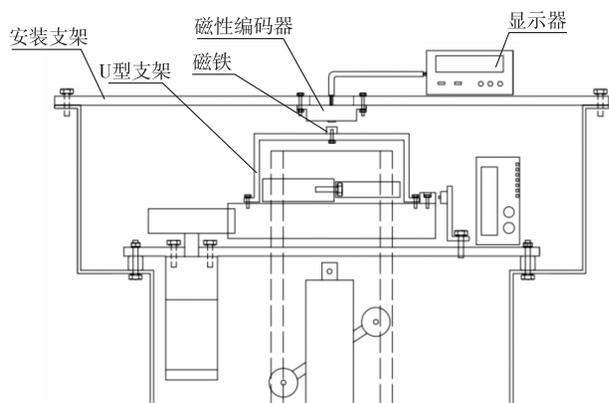


图5 测试平台的示意图

2.2.2 实验步骤

驱动步进电机正转归零即行程开关触发时停机,转速 300 r/min,此时将磁性编码器置零。然后驱动电机反转带动回转轴承旋转 180°,步进脉冲数为 27 200,记录磁性编码器输出的脉冲数,再驱动电机正转归零记录磁性编码器输出的脉冲数。重复 12 次,获得旋转机构的零点定位精度和旋转定位精度。由于存在齿轮啮合间隙,通过脉冲修正数补偿所需的脉冲数,重复上述步骤获得补偿后的精度情

况。在长期运行过程中,随着齿轮之间的摩擦磨损,旋转机构的定位精度会逐渐下降。基于测试平台,测试记录旋转机构长期运行下的精度情况,表征设备的精度疲劳性。

2.2.3 实验结果

图 6 出示了旋转机构的零点定位精度,即行程开关触发时步进电机停止的位置角度。从图中可以看出,零点的位置在初始位置附近波动,最大为 0.18°,最小为 -0.108°。12 组测试序号的平均值为 0°,标准差为 0.09°。零点定位表现出非常高的定位精度,得益于有源磁开关 M9N - D 的高稳定性和灵敏性,以及步进驱动控制技术。零点定位精度是保证旋转机构的精度符合技术要求的关键指标之一。

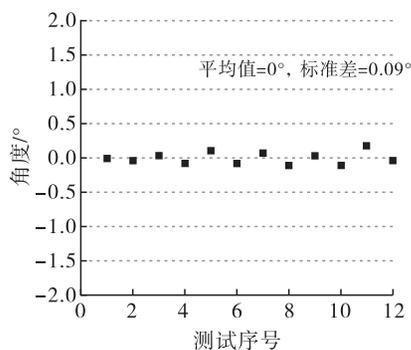


图6 零点定位精度

旋转定位精度的测试情况如图 7 所示。不论是初始测量还是补偿后测量的数据,都表现非常高的重复定位精度,其标准差分别为 0.08° 和 0.04°。没有进行脉冲补偿的初始测量数据,12 组测试序号的平均值是 177.27°,不符合技术要求,这是由于存在齿轮啮合间隙导致的。因此,旋转机构的旋转定位精度需要进行脉冲补偿。补偿后脉冲数 = 27 200 × 180 / 初始平均值。采用补偿后脉冲数后,测量得到的旋转定位数据平均值为 180.16°,最大为 180.22°,最小为 180.07°,远小于允许的定位误差 $\theta = \pm 1.5^\circ$,符合技术要求。

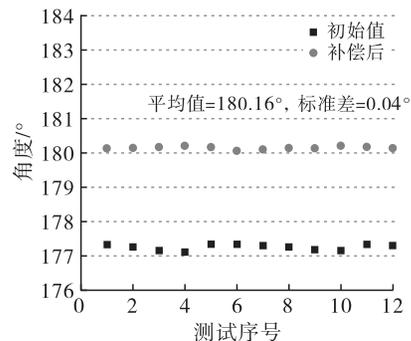


图7 旋转定位精度

更进一步地对旋转定位精度的抗疲劳性进行了长期的测试与表征,如图8所示。整体而言,随着运行次数的增加,其旋转机构的绝对定位精度逐渐下降,这是由于齿轮啮合摩擦磨损导致的^[14]。值得注意的是,在起初的6000多次运行,定位精度的下降较快,从最初的 180.16° 下降到 179.9° ,属于跑合磨损阶段。之后,定位精度趋于平稳,即使运行15000多次,仅下降到 179.86° ,处于稳定磨损阶段。从数据上可以看出,旋转机构的定位抗疲劳较高,在连续运行1万多次以后,与最初的旋转定位仅减少了 0.3° ,满足产品生命周期内的技术要求,这得益于齿轮优异的耐磨性能^[14]。

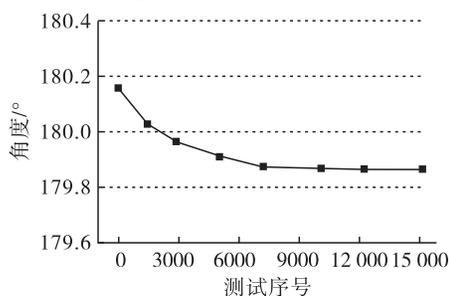


图8 疲劳性测试

2.3 整机应用测试

2.3.1 实验环境

一个稳定的地下测斜管用于进行正反测量的研究。此测斜管采用钻孔方式埋设,在钻孔、清孔后将测斜管装至钻孔内。随后采用砂土、细砂和膨润土回填测斜管周围空间,每回填3~5米时进行一次注水,直到测斜管周围残留空间填满并夯实为止。

2.3.2 实验步骤

将仪器设备按技术要求安装于测斜管上,自动进行测量获取测量数据。在20米测深下,每天正反测量12组数据,连续测量8天。

2.3.3 实验结果

图9对比了在稳定测斜管内,正反测量和仅正测的数据结果。从图中可知,正反测量的数据情况要优于仅正向测量的结果值。这一方面表现在正反测量的各个测点的数据精度更高,另一方面正反测量的数据噪点更少。测斜仪的测量值包含了当前测点的真值和系统误差。因此为了消除系统误差,对测斜管进行正反测量^[14],可以得到测点的正向测量值 A_d 和反向测量值 B_d ,并进行差分计算。该测量点的真值,即水平位移增量 Δx_d ,其中下标 d 代表测点深度,可以通过式(3)计算得到:

$$\Delta x_d = \frac{A_d - B_d}{2} \quad (3)$$

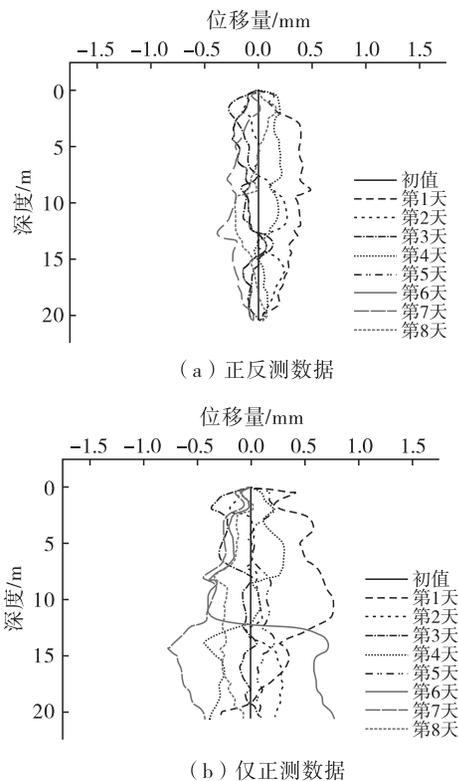


图9 正反测量与正向测量的数据对比

之后,对水平位移增量 Δx_d 进行累加计算,就可以得到每个测点的水平位移累加值 X_d^i ,即:

$$X_d^i = \sum \Delta x_d \quad (4)$$

其中,上标 i 代表数据组的编号。在基坑开挖之前,进行一次测量,获得的累加值 X_d^0 作为初始值。之后,将每次测量获得的累加值 X_d^i 减去初始值 X_d^0 ,得到的差值 L_d^i ,代表了随着基坑开挖时土体变形的实际情况。

如果只有正向测量的数据,则采用正向测量的数据 A_d 作为该测量点位的水平位移增量,然后进行累加计算。为了区别与正反测量的计算符号,将仅采用正向测量的数据计算获得的累加值记为 Y_d^i 。同时,累加值 Y_d^0 作为初始值。之后,将每次测量获得的累加值 Y_d^i 减去初始值 Y_d^0 ,得到仅采用正向数据计算获得的差值 Z_d^i 。该测量点的正反测量常数 k_d ,可以通过式(5)计算得到:

$$k_d = \frac{A_d + B_d}{2} \quad (5)$$

正反测量常数 k_d 用来判断该测点数据是否准确与可靠^[4,14]。这是因为从理论上讲,测斜仪测量时的系统误差应该是一个接近于0的常数。在实际应用中,如果 k_d 远大于或者远小于0,就会认为该测点的测量出现错误,有可能是测斜仪本身损坏或者

人工测量出现操作失误。

图 10 出示了在连续测量 8 天内,每个测点的正反测量常数 k_d 。与理论一致的是正反测量常数 k_d 是一个接近于 0 的值。但是,出人意料的是每个测点的 k_d 有略微的不同,数值在 +0.75 mm 到 -0.75 mm 之间。值得注意的是,从图中可以看到,大部分的测点 k_d 值长期稳定,仅在 ± 0.25 mm 内波动,但也有少部分的测点 k_d 值有缓慢漂移的现象。这可能是因为测斜仪的导轮结构与部分测点的测斜管壁摩擦磨合导致的。

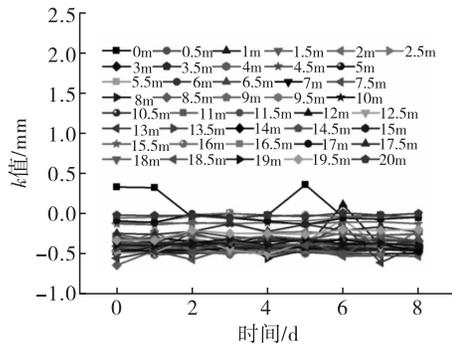


图 10 不同测点的 k 值的连续变化情况

2.4 工程应用测试

为了研究和对比正反测量数据计算法和仅正向测量的差异。基于上海某基坑工程项目,采用测斜机器人每天进行正反测量 12 次,测量深度为 33 米,连续监测 66 天的时间,并对监测数据进行了详细的研究分析。由于监测结果数据量较大,在研究分析完成以后,截取了其中几天的数据进行展示。图 11 出示了在连续监测 66 天内,仿生式全自动测斜系统进行正反测量的数据结果。数据为现场基坑第二层开挖至底板浇筑结束,其变化趋势基本符合工程现场所表现的实际工况^[15]。

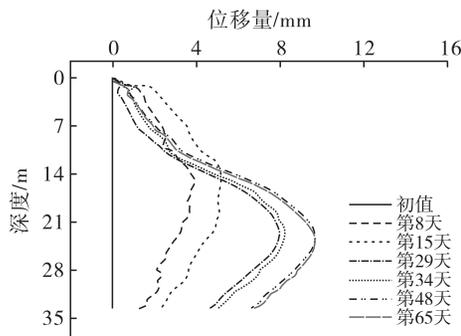
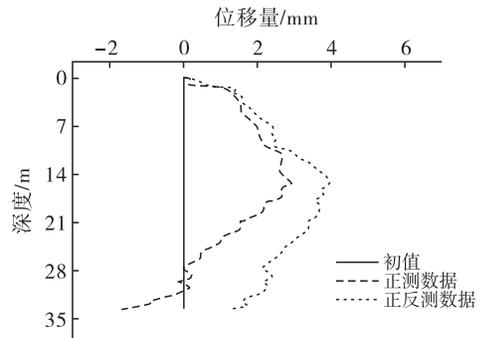


图 11 应用 ADME 进行基坑自动化监测的连续数据

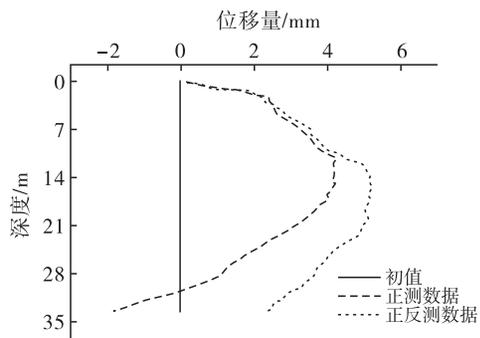
图 12 对比了仅正向测量与正反测量数据的结果。从图 12(a) ~ (f) 可以直观地看到,仅采用正测数据得到的计算结果与正反测数据存在较大的偏差,尤其是在前 30 天。但是,在第 30 天以后,

两者的数据偏差逐渐减少,直到第 65 天几乎一致了。

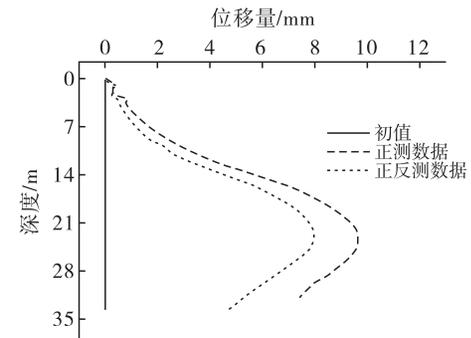
为了便于分析该现象,以及评估 k_d 值变化对仅正向测量的影响。于是将某次测量的所有测点的 k_d 值相加并除以测点数量,得到某次测量的平均值 \bar{K} 。将某次测量的 \bar{K} 值减去初值的 \bar{K} 值,则代表该次测量的 \bar{K} 值变化量,用符号 $\Delta\bar{K}$ 表示。从图 12 可以看出,在第 8 天和第 15 天, $\Delta\bar{K} < 0$,仅正向测量的计算结果小于正反测量的计算结果。在第 29 天、34 天和 48 天, $\Delta\bar{K} > 0$,仅正向测量的计算结果大于正反测量的计算结果。同时,随着时间推移, $\Delta\bar{K}$ 越来越小,表现为仅正向测量的计算结果与正反测量的越来越接近。直到第 65 天 $\Delta\bar{K} = 0.001$ mm 时,正向测量的计算结果几乎与正反测量的计算结果一致。



(a) 第 8 天, $\Delta\bar{K} = -0.044$ mm



(b) 第 15 天, $\Delta\bar{K} = -0.062$ mm



(c) 第 29 天, $\Delta\bar{K} = 0.034$ mm

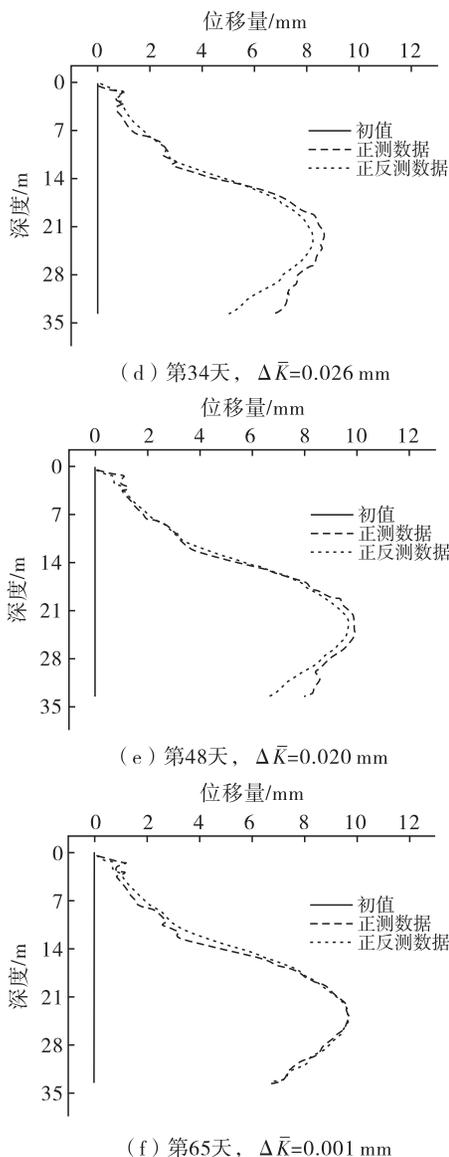


图12 正反测量常数的变化对仅正向测量的影响

从理论上可分析阐明正反测量与仅正向测量的数理关系, A_d 的表达式可以进一步分解成式(6):

$$A_d = \frac{A_d - B_d}{2} + \frac{A_d + B_d}{2} = \Delta x_d + k_d \quad (6)$$

将式(6)代入到式(5)中进行累加计算, 获得累加值 Y_d^i 。之后进行差值计算得到式(7), 表明了正反测量与仅正向测量的数理关系。

$$Z_d^i = Y_d^i - Y_d^0 = (X_d^i - X_d^0) + (K_d^i - K_d^0) = L_d^i + \Delta K_d \quad (7)$$

其中, K_d^i 和 ΔK_d 分别代表正反测量常数 k_d 的累加值和累加差值。从式(7)可知, 仅采用正向测量数据计算获得的测斜曲线等于正反测量的数据加上正反测量常数的累加差值。当 $\Delta K_d = 0$ 时, 则正向测量与正反测量的计算结果一致。如果 $\Delta K_d > 0$, 正向测量的计算结果会偏大; 如果 $\Delta K_d < 0$, 则正向

测量的计算结果会偏小。理论分析的结论与工程应用的数据结果完全符合。这也充分说明了正反测量技术在测斜监测中是不可或缺的一部分, 有效避免了仅采用正向测量作为测斜监测方法存在的风险。

3 结语

该文研究一种高精度的正反测量技术, 采用高精度步进电机和齿轮细分传动实现了测斜机器人的旋转机构设计。该机构主要由驱动部分、传动部分、夹紧结构和行程开关组成, 测斜仪放置到一根可旋转的测斜管里, 使该测斜管旋转从而完成测斜仪的 180° 转向。该机构具有定位精度高、抗疲劳性强、产品化程度高等特点, 具有非常广阔的应用前景。在此基础上, 该文详细研究了正反测量在测斜技术中的应用, 展现了其对测斜精度和可靠性的影响。

该文的实验数据表明在实际应用中每个测点的正反测量常数有略微的不同, 并且部分测点的正反测量常数都有漂移的现象。正反测量常数的漂移会导致仅采用正向测量的计算结果会出现较大的数据偏差。这也充分说明正反测量技术在测斜监测中是不可或缺的一部分, 有效避免了仅采用正向测量作为测斜监测方法存在的风险。该文弥补了测斜技术中正反测量在理论和技术层面的研究空白, 对测斜技术的实际应用以及行业规范的标准化具有指导意义。

参考文献:

- [1] 黄杰云. 工程测量技术应用浅析[J]. 测绘与空间地理信息, 2021(44): 207-209.
- [2] 李清泽, 姜清耀, 李菲. 复杂环境条件下深基坑变形控制研究[J]. 工程建设与设计, 2019(10): 33-35.
- [3] 吴必强. 地铁深基坑监测变形控制及对周边环境的影响[J]. 工程技术研究, 2020, 5(5): 259-260.
- [4] P Allasia, G Lollino, D Godone, et al. Advances on measuring deep-seated ground deformations using robotized inclinometer system[J]. Sensors, 2020(20): 3769-3790.
- [5] 王启飞, 宛宝玉, 王军涛, 等. 一种全自动测斜仪的设计与应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(2): 116-120.
- [6] 白昀. 一种仿生式全自动测斜系统的研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2023(1): 3-8.
- [7] 李俊明, 孟宪超. 自动化测斜仪在基坑监测中的应用[J]. 科学技术创新, 2021(20): 125-126.
- [8] 吴伟. 固定式基坑测斜系统研制[J]. 电子测量技术, 2016, 39(4): 27-30.

(下转第74页)

