

基于激光导向技术的反井钻高精度钻进及钻头姿态控制技术

刘希元 殷海霞

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]反井钻机深孔钻进时, 钻柱弹性弯曲、地层非均匀性以及参数不合适都会引起钻孔偏斜, 传统的测量存在滞后性。针对反井钻导孔自上而下钻进的特点, 提出基于下水平巷道激光指向仪的中靶导向方案, 设计出由激光指向仪、钻头尾部光电靶标、倾角传感器和闭环算法组成的自动纠偏系统。反井钻机扩孔钻头工作状态数字孪生实时监控由空中模块、云空间模块、物理实体、虚拟空间模块、数字孪生体组成, 构成空-云-地-孔智能监测系统。通过实时解算光靶上激光光斑偏移量来识别偏斜趋势, 用分段 PID 和模糊控制相结合的方式调节纠偏油缸的推力。工程实践证明, 钻孔偏斜率控制较好, 纠偏时间短, 可以达到导孔高精度贯通的效果。

[关键词]反井钻机; 激光导向; 自动纠偏; 姿态控制

DOI: 10.33142/hst.v9i6.20087

中图分类号: TN248.3

文献标识码: A

High Precision Drilling and Drill Bit Attitude Control Technology for Reverse Drilling Based on Laser Guidance Technology

LIU Xiyuan, YIN Haixia

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: When drilling deep holes with a reverse drilling rig, the elastic bending of the drill string, non-uniformity of the formation, and inappropriate parameters can all cause borehole deviation, and traditional measurements have lag. Aiming at the characteristics of top-down drilling of the anti drilling guide hole, a mid target guidance scheme based on the lower level roadway laser pointer is proposed, and an automatic correction system composed of the laser pointer, the tail photoelectric target of the drill bit, the inclination sensor, and the closed-loop algorithm is designed. The digital twin real-time monitoring system for the working status of the drilling bit of the anti drilling rig consists of an air module, a cloud space module, a physical entity, a virtual space module, and a digital twin, forming an intelligent monitoring system for air cloud ground hole. By real-time calculation of the offset of the laser spot on the optical target, the deviation trend is identified, and a combination of segmented PID and fuzzy control is used to adjust the thrust of the correction cylinder. Engineering practice has proven that with good control of drilling deviation rate and short correction time, high-precision penetration of guide holes can be achieved.

Keywords: anti drilling rig; laser guidance; automatic correction; attitude control

引言

反井钻井法在抽水蓄能电站竖井、矿山通风井和瓦斯管道井等工程中应用较多。当竖井深度超过 300m、直径达到 7~8m, 钻孔偏斜控制成了主要问题。传统的先导井后钻爆扩挖存在人员劳动强度大、井下风险高这些缺点, 大直径反井钻一次反提成型技术把人工钻孔爆破工序去掉, 实现了机械化换人、自动化减人。导孔偏斜是由钻具的柔性弯曲、地层非均质性以及参数不当所引起的。现有的陀螺仪逐段测量间隔大、反馈滞后, 不能对偏斜进行早期识别和主动干预。本文针对反井钻导孔自上而下的钻进

工况, 在下水平巷道布置激光指向仪, 在钻头尾部安装光电靶标进行中靶导向, 建立随钻测量和自动纠偏控制系统, 对钻孔轨迹进行闭环高精度控制。

1 反井钻施工偏斜机理及激光导向原理

反井钻导孔钻进时, 偏斜产生是由于地质状况、钻具力学性能、施工工艺参数三者共同引起的。从力学角度分析, 偏斜主要是由三个原因造成的, 第一, 钻柱弹性弯曲产生的轴向力分解。钻进时施加的轴压使具有一定柔性的钻杆产生弹性弯曲, 弯曲后的钻杆轴线与钻孔中心线不重合。钻压沿弯曲钻杆轴线作用在钻头上, 分为垂直分力和

水平分力,水平分力使钻头向侧壁切削,形成井斜。当钻压大于钻柱失稳临界值的时候,这种效应是非线性的增大。第二,地层倾角和非均质性对导向的效应。地层是非均质的,不仅各层之间物理性质不同,而且地层的可钻性、层理倾角也不同。当钻头钻进一组有倾角的地层时,钻头受到地层反作用力不均,地层下倾方向的阻力大、上倾方向的阻力小,使井孔向上倾方向倾斜。在软硬交互地层中,钻头从硬岩进入软岩时会出现跑偏,从软岩进入硬岩时会出现憋钻。第三,就是施工工艺参数选择不当。钻机定位不牢、开孔控制不好、钻压和转速不匹配都会造成偏斜。当轴压太小、钻速太快时,孔底岩渣冲洗不净会造成钻头被抬升而发生向上偏斜;当轴压太大时,钻柱屈曲效应就更加严重。激光导向技术主要原理就是形成稳定的三维空间基准轴线。激光导向技术在中靶导向方案中的基本原理就是把激光指向仪固定在下水平巷道中,调整它的仰角,使激光束沿设计导孔轴线向上投射,在钻头尾部安装光电靶标,钻头向下钻进时,激光束一直照射在靶标上;当钻具系统出现偏移的时候,激光光斑在靶面上的位置会发生

位移,根据光斑偏离基准点的矢量信息,可以反演出钻头姿态的偏斜方向和偏斜量,给自动纠偏提供实时输入。

2 激光导向反井钻自动纠偏与姿态控制系统构建

2.1 激光导向测量系统组成

激光导向测量系统由下水平巷道激光指向仪、钻头尾部光电靶标、倾角传感器、地面解算单元、数据传输通道组成,(图1)。激光指向仪固定在下水平巷道专用支架上,用光学准直得到直径为10~20mm的平行光束,激光束沿设计导孔轴线向上投射。钻头尾部或者紧接钻头的无磁钻铤尾部装有高分辨率CMOS光电靶标,用来接收激光光斑。当钻头姿态出现偏斜的时候,激光光斑中心同靶标基准点之间的偏移量(Δx , Δy)会被实时捕捉到,而倾角传感器会给出钻具的俯仰角以及横滚角。导孔钻进时,钻机导向机构内壁沿圆周布置多个纠偏油缸,纠偏油缸配合倾角传感器可以及时纠正钻进偏斜。三者数据经过编码之后用泥浆脉冲或者有线缆的方式传送到地面工控机上,采样频率可以达到10Hz,可以对钻进过程进行连续监测。

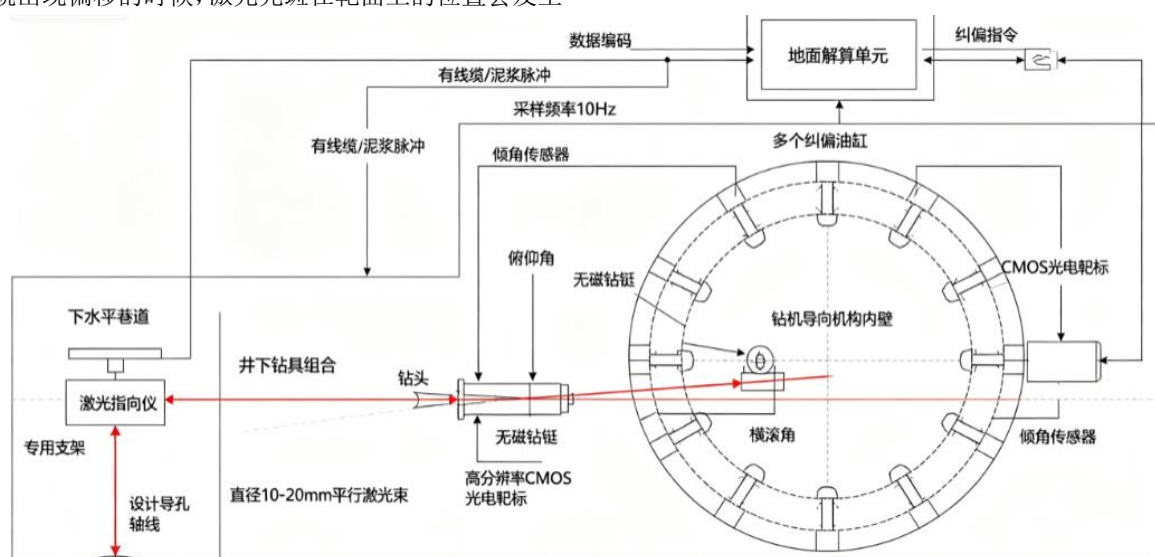


图1 激光导向测量系统原理图

2.2 自动纠偏与姿态控制实现机制

自动纠偏系统是采用感知、决策、执行闭环结构的。地面工控机接收到光靶激光偏位数据之后,根据钻进深度信息,利用运动学模型解算出当前钻孔轨迹和设计轴线空间偏差矢量,解算频率为10Hz,可以每钻进5到10mm就做一次偏差评价。控制器根据偏差量级和变化趋势,按照事先设定好的控制策略发出纠偏指令,指令包含纠偏方向角和纠偏力幅值这两个主要参数。执行机构采用沿导向机构圆周均布的分布式液压纠偏系统^[1]。当检测到光斑偏

移时,系统计算所需纠偏力的方向与大小,比例伺服阀控制各油缸的推力,在钻头尾部形成纠偏弯矩,使钻具慢慢回到设计轨迹上。纠偏时系统一直对激光光斑的位置变化进行监测,形成闭环的验证机制来保证纠偏动作的有效性。

3 激光导向反井钻高精度控制关键技术

3.1 钻头空间姿态实时感知技术

钻头姿态感知精度、实时性直接决定着纠偏控制上限。反井钻导孔激光中靶导向的实时感知关键技术有高精度

激光光斑中心亚像素定位算法（定位精度为 0.1mm），多源传感器数据自适应滤波（扩展卡尔曼融合算法抑制钻进振动干扰，振动补偿模块实时识别 10~50Hz 频段干扰信号），钻柱弹性变形补偿模型（利用有限元法建立钻柱在钻压、扭矩组合下变形的规律，修正测量值中的系统误差，模型包含钻杆直径、壁厚、材质模量、连接螺纹间隙等参数）。通过物联感知设备、多源数据融合，用统一坐标系创建出一套虚拟和现实相结合的智能监控系统，提高了监控系统的实时性、准确性、完整性。该系统可以对光电靶标图像、倾角传感器、电子罗盘和钻压扭矩数据进行同步采集和时空配准，采样频率为 10Hz，数据延迟小于 0.2s，可以保证后面偏斜识别和纠偏决策的实时闭环控制^[2]。图 2 为钻头空间姿态实时感知系统整体结构图，该系统由激光连续测量、多源传感器、钻柱弹性变形补偿模型、扩展卡尔曼融合算法等主要部分组成，可以对钻头姿态进行高精度实时感知。

3.2 偏斜轨迹动态识别技术

偏斜轨迹的早期识别为实施主动纠偏做好了铺垫。根据偏斜成因的不同，偏斜模式可以分为线性漂移型、周期性波动型和突变偏转型这三种。线性漂移型主要是由于地层倾角或者钻机安装误差导致的，表现为偏差随着深度线性累积，其斜率一般在 0.5‰到 1.0‰之间；周期性波动型

和钻柱旋转、地层软硬交替有关，波长对应于单根钻杆长度或者岩层厚度；突变偏转型多发生在岩性界面处，偏差可以在 2~3m 进尺内突然变化 10~20mm。识别算法用滑动窗口残差分析法和支持向量机分类器相结合的方法，滑动窗口长度为 10m，步长为 1m，窗口内计算偏差序列的均值、方差和一阶导数特征。系统实时对实测轨迹和设计轴线的偏差序列进行计算，当偏差变化率大于某一个阈值或者出现偏斜模式识别出需要干预的类型时，就会发出纠偏指令。同时导孔偏斜预测模型用有限元技术实现钻进轨迹模拟和姿态优化分析，对钻进过程做动态分析给出钻杆布置优化策略。预测模型把地层倾向、钻具组合刚度和钻压分布参数结合在一起，可以提前预知接下来 5~8m 范围内的偏斜发展趋向，把识别准确率提高到 92%以上，有效地削减了误报警率和漏报率。

3.3 钻进参数协同调控技术

钻进参数的选取影响着钻孔偏斜的发展方向和纠偏的效果。钻压、转速、冲洗液流量三者间存在着耦合的关系，增大钻压可以提高机械钻速但是会加重钻柱的屈曲，提高转速有利于保持钻进方向的稳定但是可能会引起共振，冲洗液流量影响孔底排渣效率和钻头冷却效果。实际钻进时，三参数互相影响造成偏斜响应呈非线性特性，单凭一个参数调节很难达到纠偏的效果。



图 2 钻头空间姿态实时感知系统架构图

表 1 参数与偏斜关联关系

钻进参数	偏斜影响机制	优化控制原则
钻压	轴压超过临界值导致钻柱屈曲，水平分力增大	控制在临界屈曲载荷的 70%以内
转速	影响钻具陀螺效应，高转速具有自稳定导向作用	根据地层硬度选择 60~120r/min
冲洗液流量	影响排渣效率与钻头冷却，流量不足可致钻头抬升	保证返渣流畅前提下取较低值

钻进参数协同调控用到的是模糊逻辑和案例推理结合起来的智能决策方法。系统依据实时监测的偏斜趋向、地层特性以及设备状况,动态调节钻压同转速之间的契合情况,在偏斜之初稍稍削减钻压,加强转速,从而依靠钻具自身的自稳定作用来阻止偏斜的发展。识别出周期性波动偏斜的时候,先微调转速避开共振区;识别出线性漂移偏斜的时候,以降低钻压为主、辅以纠偏油缸动作,达到参数调节和机械纠偏的协同控制。

3.4 自动纠偏控制策略优化技术

纠偏控制的主要难题就是纠偏动作存在时滞效应,施加纠偏力之后钻孔轨迹的变化需要一定的钻进进尺才能表现出来,过大的纠偏力度会造成轨迹“狗腿度”超标,增大扩孔阶段的摩擦阻力和钻具疲劳风险。采用分段PID控制和模糊控制相结合的方式。当偏差量小的时候,系统处于微调状态,用小比例增益来防止频繁调节;当偏差量超过一级预警阈值的时候,切换到模糊控制模式,根据偏差量和偏差变化率查模糊规则表输出纠偏指令;当偏差接近允许极限的时候,启动强纠偏模式,并向上位机报警。

表2 控制模式划分

控制模式	偏差量范围	控制策略	执行方式
微调模式	$e < 10\text{mm}$	PID 控制(小增益)	单油缸微补压
正常纠偏	$10\text{mm} \leq e < 30\text{mm}$	模糊 PID	多油缸协同加载
强纠偏模式	$e \geq 30\text{mm}$	开环强制纠偏+报警	最大纠偏力输出

纠偏油缸沿圆周布置,各个纠偏油缸的运动方向为钻头径向。控制器根据偏斜方向计算出各个油缸的推力分配系数,用差动控制方式来输出纠偏弯矩。每次纠偏进尺控制在4.5m之内。

4 工程应用效果分析

4.1 竖井施工测量精度分析

在某抽水蓄能电站竖井施工中用激光中靶导向自动纠偏系统。竖井深超过500m,扩孔直径1.4m,所在地层以花岗岩为主,局部有破碎带、蚀变带。激光指向仪固定安装在下水平巷道专用支架上,激光束沿设计轴线向上投射。钻头尾部光电靶随钻头下钻而移动,接收激光光斑。激光导向系统自导孔开钻就投入运行,实现了全过程连续监测。测量结果表明,在0~100m浅孔段,激光导向系统和陀螺仪复核测量结果的最大偏差为8mm,说明激光测量是可靠的;在300m以上深孔段,两者偏差仍然在15mm之内。激光系统比传统的逐点测量方式信息密度提高约200倍,给偏斜趋势的早期识别打下了

数据基础。

4.2 钻孔轨迹控制效果分析

终孔测量用多点陀螺仪做全孔扫描,实测数据用均角全距法计算偏斜轨迹。在140m处进行偏斜测量之后用纠偏钻具系统进行纠偏,斜度由 0.83° 减小到终孔的 0.2° ,纠偏效果较好^[3]。全孔轨迹平滑,最大狗腿度出现在岩性界面附近(160~180m段),狗腿度为 $3.2^\circ/30\text{m}$,满足扩孔钻具通过性要求。和同地区未用激光导向的对比孔相比,偏斜率降低62%,终孔偏距由平均0.35m减小到0.11m,有效地避免了由于偏斜过大造成的扩孔卡钻风险。

4.3 自动纠偏运行稳定性分析

系统在连续运行过程中没有因为传感器故障或者控制失效而造成误纠偏的情况发生,激光光源稳定满足要求(光强衰减小于5%)。整个钻进周期内,激光指向仪一直正常工作没有出现失准的情况,数据传输稳定没有出现丢包现象,纠偏油缸推力控制准确,在钻压突然变化的工况下也能保持稳定的运行。

4.4 施工质量与效率提升评价

应用激光导向自动纠偏系统之后,导孔平均钻进速度提高了大约25%。速度提高的主要原因是实时偏斜监测消除了保守钻压的顾虑,操作人员可以按照系统的提示将钻压保持在最佳区间内;减少停钻测斜的次数,纯钻进时间利用率由原来的78%提高到现在的91%。反井钻机施工技术施工效率高,可以缩短竖井施工工期,成井质量好,比传统爆破法施工噪音低、粉尘少、对围岩扰动小等综合效益更好。本工程导孔施工工期比原计划提前了12天,扩孔时没有出现由于偏斜造成卡钻的情况,竖井贯通后井壁完整,为后续衬砌施工打下了良好的基础。

5 结语

激光导向高精度钻进及钻头姿态控制技术(采用下水水平巷道激光指向仪+钻头尾部光靶的中靶导向方案)把空间基准带到反井钻导孔施工的全部过程之中,从而实现由“逐点测量、滞后纠偏”向“连续感知、主动干预”的技术飞跃。现场使用后发现,偏斜率可以控制在0.35‰以内,系统响应时间小于3s,很好地解决了深孔偏斜控制的工程难题。该系统在超500m深竖井施工过程中良好运用,扩孔阶段没有出现卡钻事故,证明了该技术是可靠的、适用于工程的。后续研究可以从以下几个方面入手,研究激光指向仪长距离(>500m)光斑衰减补偿方法;研究下水水平巷道振动对激光指向仪稳定性影响的隔离技术;结合地质随钻感知信息实现偏斜的预测性控制,根据岩性识别提

前调节钻进参数；开发适合斜井工况的激光导向技术，扩大其应用范围。

[参考文献]

- [1]刘志通.反井钻机扩孔钻头多元化实时联动系统研究[J].建井技术,2024,45(5):51-56.
- [2]马灵姬,张学亮.广东梅州抽蓄二期工程 1#、2#排风竖井反井施工工艺[J].煤炭技术,2024,43(12):79-81.
- [3]刘文敬,程守业,荆国业.反井钻机定向钻进过程中的井

帮围岩稳定技术研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(2):75-83.

作者简介：刘希元（1987—），男，高级工程师，毕业于中国石油大学，现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司，项目副经理，长期从事水利水电、抽水蓄能项目管理工作；殷海霞（1987—），女，工程师，现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司，长期从事水利水电工程项目管理工作。