

# 机械水源钻机自动化升级的研究及应用

杨联峰<sup>1</sup>, 宋飞<sup>2</sup>

(1. 山西省第三地质工程勘察院有限公司, 山西 晋中 030620; 2. 贝加尔(上海)智能有限公司, 上海 201109)

**摘要:**传统水源钻机的加压送钻等操作受到操作者经验的影响较大,工作环境和安全条件也较差。为更好地满足中深层地热井施工的需求,对现有一台TSJ-3000型水源钻机进行了自动化升级改造。增加了司钻房;运用伺服控制系统,实现触感式摇杆提钻下钻功能和自动恒压送钻功能;采用自动传感式换挡模组,在司钻房内实现快速换挡、变速,使司钻房远离钻机转盘;采用工控屏触摸方式集成现场主要电柜控制器;实现了自动化和手动操作两个独立的操作系统。现场试验和应用表明,自动化升级后钻机运转参数能够实时监控和集中显示,为判断、预防井内事故提供科学依据;能满足3000 m水源钻机钻具悬重800 kN条件下的提、下钻工况需求,钻进效率比改造前提高了61%;降低了劳动强度,改善了操作环境。本项目顺应了钻探设备自动化、数字化、智能化发展趋势,具有良好的应用前景。

**关键词:**机械水源钻机;自动化升级;人机交互;智能司钻;司钻房;中深层地热井

**中图分类号:**P634.3;TE92 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0476-05

## Research and application of automatic upgrading of mechanical water well drilling rig

YANG Lianfeng<sup>1</sup>, SONG Fei<sup>2</sup>

(1. Shanxi Third Geological Engineering Investigation Institute, Jinzhong Shanxi 030620, China;

2. Baikal (Shanghai) Intelligent Co., Ltd., Shanghai 201109, China)

**Abstract:** The operation of traditional water well drilling rig, such as pressure drilling, is greatly influenced by the operator's experience, and the working environment and safety conditions are also poor. An TSJ-3000 water well drilling rig has been upgraded automatically to better meet the needs of the construction of middle-deep geothermal wells. The original equipment is not changed, and the driller's room is added; The servo control system is used to realize the function of lifting and lowering the drill by the touch rocker and the function of automatic constant pressure drilling. Adopt automatic sensing shift module to realize quick shift and speed change in the driller's room, so that the driller's room is far away from the rig turntable; Using industrial control screen touch mode to integrate the main electric cabinet controller on site; Two independent operating systems, automation and manual operation, are realized. The field test and application show that the operation parameters of the drilling rig can be monitored and displayed in real time after the automation upgrade, which provides scientific basis for judging and preventing accidents in the hole. It can meet the requirements of lifting and tripping under the condition that the drilling tool of 3000 m water source drilling rig has a hanging weight of 800kN, and the drilling efficiency is 61% higher than that before the transformation. The labor intensity is reduced and the operating environment is improved. This project conforms to the development trend of automation, digitalization and intelligence of drilling equipment, and has a good application prospect.

**Key words:** mechanical water well drilling rig; automated upgrade; man-machine interaction; intelligent driller; driller's room; middle-deep geothermal well

收稿日期:2023-03-29 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.077

第一作者:杨联峰,男,汉族,1968年生,副总经理,高级工程师,探矿工程专业,主要从事水文水井、地热井、旋挖钻孔等钻进工艺的技术研究与管理工作,山西省晋中市榆次区大学街三勘院,sxjlyf@sohu.com。

引用格式:杨联峰,宋飞.机械水源钻机自动化升级的研究及应用[J].钻探工程,2023,50(S1):476-480.

YANG Lianfeng, SONG Fei. Research and application of automatic upgrading of mechanical water well drilling rig[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):476-480.

## 0 引言

传统的机械水源钻机自20世纪90年代研制成功以来,经过长期实践应用和不断改进,结构性能已趋合理完善,具有结构紧凑、传动可靠、价格便宜、操作维护方便等优点。目前主要型号有TSJ-1000、TSJ-2000、TSJ-2600、TSJ-3000型,是我国中深层水井、地热井施工的主要机型,市场保有量大,工人操作熟悉程度高<sup>[1-4]</sup>。

目前国内钻深3000 m以上型号的钻机都在向电动化方向发展,自动化程度高,钻井效率高;但钻深<3000 m以下钻机还多是传统的机械钻机,司钻操作人为因素大、工人劳动强度大、作业环境和安全条件差、生产效率低、市场竞争能力差<sup>[5-8]</sup>。主要表现在如下几个方面。

(1)对钻机操作者的要求高。由于是手动机械操作,因此对操作者的经验、熟练程度、责任心等要求较高,需经过多年培养才能操作钻机带班。钻进效率的高低与操作者水平有直接的关系。操作人员责任心不强、注意力不集中,钻机空转也容易造成井内事故。

(2)正常钻进过程加压送钻不稳定。根据操作者的手感控制,压力忽大忽小,因此对钻进效率、孔斜、岩心采取、设备运转等都会产生影响。尤其是当钻具质量大、减压钻进时,操作更难控制,很容易造成孔内事故。

(3)操作人员工作环境和安全条件差。操作人员需要用手一直扶着刹把,工作强度大;操作人员需忍受风吹、雨淋、日晒、冷冻,工作环境差;操作者紧挨着井口位置,跑钻、高处坠物、喷浆等都会对其造成安全伤害。

随着经济社会的发展,对钻井设备的需求从能力的提升已转变为对设备自动化、数字化及安全性的新需求。因此,对现有的机械钻机进行自动化改造有着现实的必要性和迫切性,通过技术改造提升钻机的自动化和智能化水平,改善作业环境和安全条件,提高钻井效率<sup>[9-12]</sup>。

为更好地满足中深层地热井施工要求,对现有一台TSJ-3000型水源钻机进行了自动化升级改造。

## 1 总体方案设计

在对原TSJ-3000型水源钻机总体结构不做改动的基础上,增加司钻房,应用电、气、数字化等现代

工业信息技术;运用伺服控制系统,实现触感式摇杆提钻、下钻功能和自动恒压送钻功能;采用自动传感式换挡模组,在司钻房内实现快速换挡、变速,使司钻房远离钻机转盘;采用工控屏触摸方式集成现场主要电柜控制器;保留原有手动操作系统并增加了自动化操作系统,实现自动化和手动操作两个独立的操作系统。升级改造后的钻机如图1所示。



图1 自动化升级改造后的TSJ-3000型钻机

### 1.1 司钻房设计与布局

司钻房作为重要控制室平台,不仅能够改善工作环境,降低人员的劳动强度,还可提升操控的舒适度,在伺服系统自动化控制方面达到量化、智能化、数字化标准,并将现场的电控、电柜、自动换挡等模块化集成设计。使司钻房远离钻机,扩大转盘工作区域,增加作业人员的观察视野。为了便于后期智能化远程管理,特预留智能监控、物联网系统远程电源接口,作为后期功能拓展。

司钻房设计位置在主电机正后方,设计尺寸为:长5.5 m、宽2.4 m、高3 m;控制台目视前方采用全钢化玻璃,长2.2 m、高1.3 m;房顶斜面操作员目视钻塔顶区域采用钢化玻璃,在室内可观察到钻机塔顶30 m高的位置;室内两侧设计6组高压电柜,如图2所示。



图2 司钻房内部布局

### 1.2 高压配电柜功能分布

(1)司钻房内两侧设置6组高压电柜,尺寸2.1 m×2.0 m,安装200~400 V电网进线,设计钻机主启动柜和副启动柜、附属设备电控柜、电磁刹车控制柜。

(2)在司钻房左侧外部设置快速航空插座7个和预备插座3个,连接混料泵、砂浆泵、搅拌机、振动筛、泥浆分离器等外部用电设施。

### 1.3 设备控制系统

设备控制系统主要由电控工控系统、伺服驱动器、伺服电机传动系统、自动换挡模组、日本三菱PLC程序系统、传感编码器、手感重力推动器、安全紧急UPS刹车备用系统等组成,整套系统设计制造本着“先进、可靠、方便、经济”的原则,其自动控制特性、操作逻辑和各种保护、防抱死卡钻、滑钻保护等功能可满足3000 m水源钻机性能及钻进工艺要求。

#### 1.3.1 操作平台功能布局设计

控制平台见图3,设计尺寸为:2.2 m×1.0 m×1.0 m,司钻员为坐式操作模式;手动摇杆设计于平台正中心,便于坐着操纵设备,提升舒适度;主屏监控32 in显示器设计在平台中心,程序控制系统设计于监控屏下方,角度倾斜,便于观察;工控电路系统设计在主屏左右两边,人性化界面排版布局,人机交互式动态图表显示;泥浆泵立管压力显示、变频调速、摇杆调速、转盘转数显示等。



图3 控制平台

#### 1.3.2 伺服系统功能设计

(1)PLC作为主要程序控制核心,通过PID过程控制以及人工智能算法程序,控制器采集现场信号以通信方式智能下达控制指令,并将各种状态反馈到工控系统中进行监控、故障报警、诊断等功能,系统设计具备钻井的钻压设定、恒定匀速下钻设定、自动程序送钻设定(送钻速度可调)、预钻时间设定、钻具悬重保存及归零设定、井深显示及存储、钻具数量记录、提下钻防卡钻保护等智能任务。为了防止PLC系统因故障引起的系统瘫痪、意外断电等因素,系统还设计了旁路供电系统,在紧急状态下自动切换,可供伺服电机采取紧急刹车,确保钻井作业安全。操作界面如图4所示。



图4 钻井操作界面

(2)自动感应式换挡。为使司钻房远离钻机,扩大视野范围,改善转盘周围的安全环境,将传统人力换挡改为自动感应换挡,由3组气动马达低扭矩控制齿轮箱连杆,将控制开关引入到操作平台工控系统中,当遇到其中一组齿轮有卡死现象,另外一组气动马达通过工控点动,自动检测卡槽位置,相互配合完成换挡作业。自动感应式换挡如图5所示。

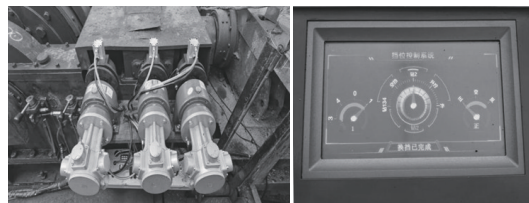


图5 自动感应式换挡系统

(3)配备防抱死监测。钻杆在井下自动钻进作业时,扭矩负荷超过设定最大值时(阶梯性设定值),系统判断会存在卡钻风险,此时系统会自动停止送钻、声音报警,为现场操作人员提供异常处理判断。

(4)配备钻杆下滑监测。钻杆在自动恒定匀速送钻作业时,若钻杆突然发生下滑距离 $>2$  cm时(设定值可调),系统会停止送钻并自动启动紧急刹车,声音报警,为现场操作人员提供异常处理判断。

(5)游动滑车配备上碰下砸硬件监测。为防止游车冲顶和碰撞钻台面,在绞车位置设计安装编码器以及行程限位器双重限位保护,游车下降距离钻台面2 m范围内,摇杆手柄设计阶段性缓冲,避免瞬间停顿而造成缓冲阻力过大。

(6)配备独立双刹车功能。双系统独立保护刹车,互不干涉,自动钻进作业、摇杆下钻作业、提升作业、手动作业、意外断电、程序系统瘫痪、硬件故障等任何异常,在不受任何的干涉、条件制约危险情况之下,即可启动紧急刹车功能。

(7)配备井深测量装置。通过旋转编码器计算钻进位移,加接钻杆前游车钩位为 $H_1$ 时,钻杆长度

为 $I$ (人工测量),当游车钩位为 $H_1+I$ 时开始累积钻进深度,起钻停止记录。

### 1.3.3 工控系统电路设计

工控系统采用19 in工业触摸屏(见图6),通过人性化界面设计布局,实现对钻机、泥浆泵、空压机、液压站、渣浆泵、混料泵、搅拌机、潜水泵、振动筛、泥浆分离器等井场设备的控制及运行状态显示。



图6 工控系统触摸屏

### 1.3.4 伺服电机、驱动配置方案

伺服驱动器、折叠式伺服电缸作为核心传动部件,采用进口伺服电机,高速、高频度、高定位伺服电机能够精准化尺寸控制,经齿轮传动输出4 kN推力,往复伸缩速度可达1000 mm/s,能够快速执行PLC程序下达的指令,如图7所示。为防止意外断电出现滑钻,伺服系统配备了UPS不间断电源供电,断电时自动启动并执行刹车。

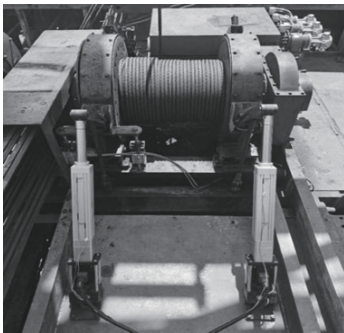


图7 伺服电机

### 1.3.5 摇杆重力感应技术方案

采用重力感应摇杆操作,收集伺服系统传动重力,双重交互信号采集,经过磁阻机构无极调速,从而达到触感式摇杆控制,推力越小伺服电机移动速度越慢,推力越大移动速度越快,从而达到精准化提、下钻功能。重力感应摇杆如图8所示。

### 1.3.6 扩音功能

因操作室隔音密闭,现场施工环境噪声太大,为便于互通,在控制室设计了大功率功放机、语音接收器系统。

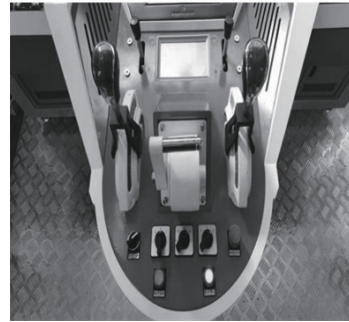


图8 重力感应摇杆

## 2 升级后钻机的主要特点

(1)在原钻机的基础上进行升级改造,对原钻机没有进行总体结构改变,保留了原钻机手把操作系统,实现了自动化操作和手把操作两套独立操作系统。

(2)新研制的伺服控制系统,实现了触碰式重力感应摇杆提下钻、自动送钻、提下钻防卡钻保护等功能,大幅降低了工人劳动强度,有效避免了提下钻过程中卡钻事故的发生。

(3)独立的司钻房设计,操作集中,设计更人性化,工作环境更舒适,劳动强度低,作业环境得到极大改善。

(4)现场设备的电控柜模块化集成到司钻房内,便于移动搬迁。设备控制平台作为核心主控制中心,赋予有科技元素设计感,人机交互式界面,集成现场主要工控电源,触摸界面动态设计,相较于按键式稳定性更强,机动性灵活。

(5)触碰式重力感应摇杆系统,控制精度高、力矩恒定、响应快速、将微距离位移量化,人体手感可控,推力感阻力可调。

(6)自动感应式换挡,将传统人力转换为自动感应换挡,自动检测卡槽位置,将控制开关引入到司钻房操作平台工控系统中,使司钻房远离机台,扩大了视野范围,提升了作业场地的安全性。

(7)控制系统开发的双独立刹车保护、钻杆防抱死保护、超距离滑钻保护、游动滑车上碰下砸保护、旁路刹车UPS断电保护等自主保护功能来抵御不可控的因素,保证钻井施工的安全。

## 3 试验与应用

### 3.1 提下钻额定荷载试验

TSJ-3000型水源钻机自动化改造升级完成后,

在山西原平大营地热资源勘查项目GR1井进行了提下钻额定荷载试验验证工作。

原平大营地热资源勘查项目GR1井设计井深3060 m,实际完钻井深4020 m,完钻口径152 mm。自动化改造升级试验时,项目已经完钻,在进行抽水试验工作。

抽水试验结束后,在井内重新下入 $\varnothing 89$  mm石油钻杆4000 m,钻具总悬重860 kN,进行了提、下钻功能测试。测试结果表明,伺服控制系统和触碰式重力感应摇杆系统能够快速精准控制钻杆提、下钻的精度位移,刹车平稳、安全,完全能满足3000 m水源钻机,钻具悬重800 kN条件下的提、下钻工况需求,操作精准、平稳、安全。

### 3.2 现场应用

在山西晋中小五台地热资源勘查项目进行了生产应用,图9为施工现场。



图9 晋中小五台地热资源勘查项目工地

晋中小五台地热资源勘查项目,于2021年10月12日开钻,2022年3月23日完钻,历时163 d,完钻井深2510 m。采用四开井身结构:一开井径444.5 mm,井深63.41 m;二开井径393.7 mm,井深667.87 m;三开井径311.1 mm,井深1625.43 m;四开井径215.9 mm,至完钻。取心进尺97.06 m,岩心长度89.55 m,岩心采取率92.3%,钻井质量完全满足地质设计的要求。

该井平均时效1.53 m,与本文第一作者单位在附近施工过的同地层条件的百草坡房车营地地热井平均时效0.95 m相比,钻进效率提高了61%。

在实钻过程中,TSJ-3000型水源钻机自动化升级改造综合性能得到了充分验证,钻机运转平稳,提下钻作业精准安全,自动送钻程序稳定,防护功能工作可靠,钻机运行和钻进参数显示准确,传统机械水

源钻机施工中表现的不足得到了很好的解决。施工人员认为钻机通过自动化升级改造后,性能先进,操作简单且手感好,大大降低了劳动强度,改善了工作环境、安全性高;钻机运转参数和钻进参数能够实时监控和集中显示,为判断、预防井内事故提供了科学依据。同时,控制系统可在远程操控,发生故障后可以得到快速解决,消除了施工人员的顾虑。

### 4 结语

探索和尝试应用电、气、数字化等现代工业信息技术对TSJ-3000型机械水源钻机进行自动化升级,既保留了原来的手动操作,又提升了钻机的自动化、数字化水平,性能安全可靠,能够满足中深水井、地热井钻探施工工艺的需要。将先进信息技术与传统钻探设备融合,进行功能创新,而且升级改造成本低,顺应了钻探设备向自动化、数字化、智能化方向发展的趋势,具有很好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 朱本温,刘雅静,魏双会,等.在役海上模块钻机自动化升级方案设计[J].石油矿场机械,2022,51(5):47-57.
- [2] 张虎山,周天明,乌买尔·达吾提,等.7000 m自动化钻机的研制与应用[J].机械制造,2022,60(7):26-30.
- [3] 石文明.7000m自动化钻机应用与建议[J].设备管理与维修,2022(3):126-127.
- [4] 王天龙,马斌,董洪波.煤矿用自动化钻机远程监测系统研制[J].煤田地质与勘探,2022,50(1):80-85.
- [5] 张强,王定亚,邹涛,等.8000 m四单根立柱自动化钻机研制[J].石油矿场机械,2021,50(4):66-70.
- [6] 柴喜元,谭颖,欧阳志强,等.机械传动立式岩心钻机自动化升级的研究及应用[J].地质装备,2021,22(3):7-11.
- [7] 张立立,高迅.7000米钻机自动化升级改造系统的研制及应用[J].石化技术,2019,26(12):232-236.
- [8] 孙长征,李进付,李海营,等.在役钻机管柱自动化升级改造技术与实践[J].西部探矿工程,2019,31(2):48-52.
- [9] 倪沛增.管柱自动化处理系统在钻机改造升级中的应用[J].化工设计通讯,2017,43(6):235.
- [10] 杨双业,于兴军,黄悦华,等.管柱自动化处理系统在钻机改造升级中的应用[J].机械工程师,2016(11):154-156.
- [11] 颜菁菁.石油钻机自动化技术的问题及发现建议[J].中国石油石化,2016(S2):2-4.
- [12] 李静.石油钻机自动化发展探讨[J].山东工业技术,2015(9):79-80.

(编辑 李艺)