

13000 m 大深度绳索取心绞车关键技术研究

刘凡柏^{1,2,3,4}, 吕振平⁵, 王玉丹⁶, 高洁云^{1,2,3,4},

刘晓林^{1,2,3,4}, 李文秀^{1,2,3,4}, 刘家誉^{1,2,3,4}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399; 2. 中国地质学会自动化智能化钻探装备创新基地, 天津 300399; 3. 中国地质调查局深部探测钻探装备技术创新中心, 天津 300399; 4. 自然资源部地质钻探找矿装备创新中心, 天津 300399; 5. 烟台杰瑞石油装备技术有限公司, 山东烟台 264003; 6. 中国地质大学(武汉), 湖北武汉 430074)

摘要:针对我国超万米科学钻探缺乏自主化绳索取心装备的工程难题,开展了13000 m大深度绳索取心绞车设计研究。综合考虑小环间隙活塞效应及井斜摩擦等复杂工况,构建钢丝绳提升力学模型,通过数值仿真量化不同加速度下钢丝绳峰值载荷,确定启动加速度 0.1 m/s^2 、匀速提升速度 $\leq 1\text{ m/s}$ 的安全作业区间,并确定了额定牵引力 200 kN 、储绳量 $\geq 14500\text{ m}$ 及钢丝绳直径 17.3 mm 、钢级 2160 MPa 等核心技术参数。提出了牵引绞车减张力与储绳绞车组合的总体结构,设计了双摩擦绞盘主从同步驱动系统,并采用松弛补偿器与PID恒张力控制及自动排绳技术,实现钢丝绳有序缠绕与张力缓冲。设计了基于Profinet总线的分布式电控系统以保障精准操控。研究结果表明,该设计方案可有效降低钢丝绳缠绕张力,解决乱绳损伤与控制精度难题,满足特深井安全连续取心需求,为我国深地探测装备国产化提供了关键技术支撑。

关键词:绳索取心绞车;牵引绞车;储绳绞车;恒张力控制;自动排绳;超万米科学钻探;特深井;钻探装备

中图分类号:P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)05-0017-11

Research on key technologies of 13000 m wireline coring winch

LIU Fanbai^{1,2,3,4}, LÜ Zhenping⁵, WANG Yudan⁶, GAO Jieyun^{1,2,3,4},

LIU Xiaolin^{1,2,3,4}, LI Wenxiu^{1,2,3,4}, LIU Jiayu^{1,2,3,4}

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China; 2. Innovation Base for Automatic and Intelligent Drilling Equipment, Geological Society of China, Tianjin 300399, China; 3. Innovation Center for Deep Exploration and Drilling Equipment Technology, CGS, Tianjin 300399, China; 4. Innovation Center for Geological Drilling and Mineral Exploration Equipment, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300399, China; 5. Yantai Jereh Petroleum Equipment & Technologies Co., Ltd., Yantai Shandong 264003, China; 6. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: To address the challenge posed by the lack of domestically manufactured wireline coring equipment for ultra-deep scientific drilling exceeding 10000 m in China, a design study on a 13000 m deep wireline coring winch was conducted. Considering complex working conditions such as the piston effect induced by narrow annular clearance and caused by borehole deviation friction, a mechanical model for wire rope hoisting was established. Numerical simulation was performed to quantify the peak load of the wire rope under different accelerations, determining a safe operating range with a starting acceleration of 0.1 m/s^2 and a maximum constant hoisting speed of 1 m/s . Accordingly, the core technical parameters were determined, including a rated traction force of 200 kN , a rope storage capacity of no less

收稿日期:2026-05-04; 修回日期:2026-06-14 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.05.002

基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题(编号:2024ZD10000801)

第一作者:刘凡柏,男,汉族,1971年生,正高级工程师,工程机械专业,从事钻探设备的设计与开发工作,天津市东丽区锦鲤道23号, lfanbai@mail.cgs.gov.cn。

引用格式:刘凡柏,吕振平,王玉丹,等.13000 m大深度绳索取心绞车关键技术研究[J].钻探工程,2026,53(5):17-27.

LIU Fanbai, LÜ Zhenping, WANG Yudan, et al. Research on key technologies of 13000 m wireline coring winch [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5): 17-27.

than 14500 m, a wire rope diameter of 17.3 mm, and a wire rope grade of 2160 MPa. An integrated structure combining a tension-reducing traction winch and a storage winch was proposed. A master-slave synchronous drive system with dual friction drums was designed, incorporating a slack compensator, PID-based constant tension control, and automatic spooling technology to achieve orderly winding and tension buffering of the wire rope. A distributed electrical control system based on the Profinet bus was developed to ensure precise operation. The results indicate that the proposed design can effectively reduce the winding tension of the wire rope, mitigate issues of disorderly spooling and associated wear, and improve control accuracy, thereby meeting the requirements for safe and continuous coring in ultra-deep wells. This study provides key technical support for the localization of deep earth exploration equipment in China.

Key words: wireline coring winch; traction winch; cable storage winch; constant tension control; automatic rope arranging; scientific drilling exceeding 10000 m; ultra-deep well; drilling equipment

0 引言

地球为人类提供了资源、能源和生存环境,同时又给人类带来了地震、火山、泥石流等地质灾害。人类为了自身生存的需要,迫切希望了解地球。科学家们试图运用地球物理和地球化学等方法来探测与研究地球内部,但所获得的认识都是间接的。科学钻探是目前能直接获取地下实物数据和提供测量通道的唯一技术方法,是人类解决资源、灾害、环境等重大问题不可或缺的手段,被誉为“伸入地壳的望远镜”^[1]。

科学钻探获取岩心的方法主要有提钻取心和绳索取心。提钻取心具有工具简单、岩心直径大等优点,但耗费时间较长,整体钻探效率不高,一般用于分段取心或者浅孔取心。绳索取心通过钢丝绳将内管总成取出,只有当钻头磨损需要更换或打捞岩心失败时才提大钻,这种取心作业效率高,对井筒扰动小,显著降低井壁失稳风险,一般用于连续取心或者深孔取心。虽然绳索取心技术在深井中具有众多优点,但由于配套钻具特殊,技术要求更高,全球万米深井钻探工程中尚未见应用实例。松科2井采用绳索取心技术成功实现了6300 m深度的连续取心验证,是我国现有陆地钻探已知最深的应用实践^[2]。

1 国内外绳索取心绞车现状分析

绳索取心绞车是取心钻探施工的重要设备,起下内管总成、控制升降速度等操作均由绳索取心绞车来完成,钻孔越深其作用越重要,在参数设计中不仅要满足使用要求,还要保证取心过程的安全与效率,可监测、可控制,准确掌握下放打捞器是否到位。传统的绳索取心绞车(图1)一般由电机、变速器、控制手把、卷筒等部件组成,具有结构简单、安

装及操作方便、噪声小、机械磨损小等优点,如果不配排绳器,卷筒上钢丝绳排绳混乱,钢丝绳易损伤、拉断^[3-7]。国内浅孔用取心绞车一般不配排绳器,深孔用取心绞车大多配有排绳器。排绳器是绳索取心绞车的重要辅助设备之一,一般由电机或液压马达驱动丝杠,实现钢丝绳的有序排绳^[8-9]。

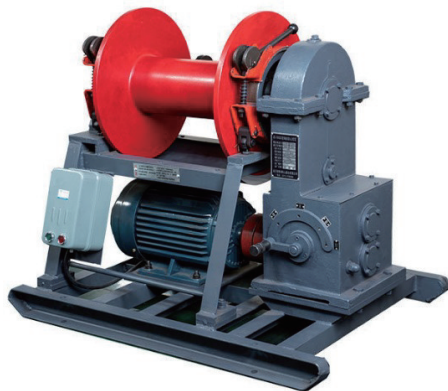


图1 JS绳索取心绞车

Fig.1 JS wireline coring winch

国内不同钻深的机械立轴钻机、全液压岩心钻机、顶驱钻机等所配套的取心绞车系列全、型号多,钢丝绳直径5~13 mm,取心能力已达到6500 m。5000 m电动绳索取心绞车(图2)在钻深4007.01 m的JZ04地热勘探井进行多次打捞作业,可实时显示张力、绳长、打捞速度等数据,数字化程度高,各机构运行良好;6500 m液压绳索取心绞车(图3)成功应用于松科2井,配备自主研发的被动液压式排绳机构多次完成超5000 m深度的取心任务。传统的绳索取心绞车系统的基本功能已经能够满足常规钻井需求,大多在滚筒前面配有排绳机构,滚筒旋转储存钢丝绳的同时可有序排绳。这种型式为直排型,具有结构紧凑、控制简单的特点,但是钢丝绳

的所有拉力均作用在卷筒上,工作过程中钢丝绳负载变化大,外层钢丝绳对内层钢丝绳的挤压作用大,严重影响钢丝绳使用寿命^[10-14]。



图2 5000 m 电动绳索取心绞车

Fig.2 5000 m electric wireline coring winch



图3 6500 m 液压绳索取心绞车

Fig.3 6500 m hydraulic wireline coring winch

国外用于固体矿产勘探的全液压岩心钻机所配套的绳索取心绞车大多为液压驱动,应用孔深达到3200 m,大都配有排绳机构,属于直排型。拥有万米级绳索取心绞车的公司有丹麦 MacArtney 公司、挪威 RAPP 公司等。这种万米级绳索取心绞车主要特点是绞车的收放系统由牵引绞车和储绳绞车两部分组成。牵引绞车(又称减张力装置)由结构相同、顺序排列的两个卷筒构成,每个卷筒上带有多个平行绳槽(通常6个绳槽)。连接井底钻具的钢丝绳先进入牵引绞车,在两个卷筒上交替缠绕,再通过恒张力排绳机构进入储绳绞车。这种结构的优点是由牵引绞车独立提供提升力,消除了缠绕半径变化对驱动力矩的影响。恒张力排绳机构可将储绳卷筒钢丝绳的张力维持在一个有限的范围内,避免外层绳进入内层,防止乱绳、咬绳,既有利于排绳整齐,又可延长钢丝绳寿命。我国的“梦想”号大洋钻探船钻探系统配套的11000 m绳索取心绞车(图4)就来自 RAPP 公司,卷筒储绳量超12000

m,适用钻深达11000 m。这种型式的绞车控制复杂,但控制精度高^[15],我国还未完全掌握,需要集中力量攻关。



图4 11000 m 电动取心绞车

Fig.4 11000 m electric wireline coring winch

2 大深度绳索取心绞车主要参数确定与依据

大深度绳索取心绞车设计的核心指标是满足钻深13000 m,其提升力与所选钢丝绳密切相关。在不超过5000 m孔深时,通常取孔内钢丝绳的质量与内管总成质量之和再加上200 kg,所对应的重力为额定提升力,其他因素不再考虑。当钻孔超过5000 m时考虑因素需更多,如钻井液密度、钻孔轨迹、提升速度、提升加速度、活塞效应等多因素影响,需要对钢丝绳进行负载分析。参考“梦想”号大洋钻探船配套的11000 m绳索取心绞车,其钢丝绳直径为17.3 mm(钢丝绳等级2160 MPa),在确定13000 m大深度绳索取心绞车额定提升力时可采用国产此规格钢丝绳进行提升负载分析。

2.1 超万米深井取心工况分析

超万米深井取心具有“高温高压、小环空间隙、多变井眼轨迹”的特性,这些因素共同决定了绳索取心提升载荷的复杂性。

(1)高温高压。随着井深增加,超万米地层温度可达300℃,井底的钻井液循环温度也会达到150℃,井底静压约为180 MPa^[16]。温度升高会降低钻井液黏度,从而减小流体阻力;压力升高会使钻井液密度及黏度略微升高,使流体阻力增大。两者的作用互相抵消,可忽略高温高压对流体阻力的影响。从钢丝绳承载能力看,井底的高温高压会降低钢丝绳承载能力,但井底的钢丝绳负载小,钢丝绳的最大受力点位于井上。钢丝绳薄弱位置处于常温常压环境,故可忽略高温高压对钢丝绳承载能

力的影响。

(2)小环空间隙与活塞效应。内管总成与钻杆内壁之间的环空间隙仅5 mm,提升过程中内管总成在钻杆内上行,其上部钻井液需通过内管总成与钻杆内壁的小环空间隙向下流动,受黏性沿程损失和环空节流作用,在岩心管上下端形成显著压力差,产生附加压差阻力,该现象称为“活塞效应”。

(3)井斜弯曲与摩擦阻力。超深井钻进过程中井眼轨迹难以保持完全垂直,井筒的井斜与弯曲会引起钢丝绳或内管与钻杆壁面的接触,摩擦阻力沿程累积并可能与流体阻力叠加放大,增加提拉困难和卡阻风险。

综上所述,超万米深绳索取心提升系统的提升载荷需综合考虑重力、浮力、流体阻力与摩擦阻力等多种因素,并结合动态载荷评估峰值张力。

2.2 钢丝绳受力分析

万米深孔绳索取心提升过程中钢丝绳受力包括:钢丝绳与内管总成(装满岩心)重力、钻井液浮力、井斜摩擦力及钻井液流体阻力,其中流体阻力由压差阻力与黏滞阻力组成,具体受力情况如图5所示。流体在内管壁面法向压力分布不均匀,在内管下端和上端形成压力差,本文中称为“压差阻力”,是提升过程中“活塞效应”的来源,其作用位置在内管总成的端面上。流体在岩心管外壁及钢丝绳表面产生切向应力,该剪切应力沿表面积分后,表现为阻碍岩心管上升的黏滞阻力。黏滞阻力主要作用于钢丝绳和岩心管总成的侧面。超深井钻进过程中井眼轨迹难以保持完全垂直,井斜与弯曲会引起钢丝绳或内管与钻杆内壁面的接触,并产生摩擦阻力。

取心作业中,内管总成由钢丝绳牵引在钻杆内向上运动,受力平衡:

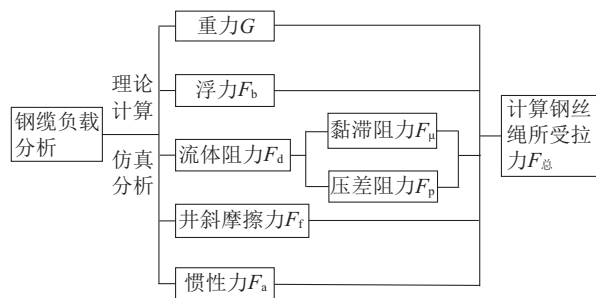


图5 钢丝绳提升模型受力分析

Fig.5 Force analysis of the wire rope hoisting model

$$F_{\text{总}} = G - F_b + F_v + F_p + F_f + F_a \quad (1)$$

式中: $F_{\text{总}}$ ——钢丝绳所受拉力; G ——钢丝绳与内管总成所受的重力; F_b ——钢丝绳和内管总成所受的浮力; F_v ——黏滞阻力; F_p ——压差阻力; F_f ——井斜摩擦力,即钻杆与内管总成的摩擦力; F_a ——惯性力,在加速的情况下考虑。

其中重力与浮力的计算方法较为明确,可根据结构参数及流体密度直接计算求解。流体阻力是钢丝绳负载的重要组成部分,且在小环空间隙、长行程的工况下占主导地位,通过仿真求解。

在取心阶段,钢丝绳和内管总成从井底向上运动,其中:钢丝绳自重随着提升而逐渐减小;流体阻力中的压差阻力与加速度和速度正相关;黏滞阻力与运动速度及流体黏性特性相关;井斜摩擦力在井斜条件下沿程累积,并且随着张力水平的增大而增大。在井底提升启动阶段,内管总成的运动过程可视为静止—匀加速—匀速的分段运动,钢丝绳负载持续增大,并在进入匀速运动之前达到最大值。以该阶段峰值作为绞车提升力的依据。

钢丝绳的最大负载与提升速度和加速度都有关系。按提升速度1 m/s、深度13000 m、钻井液密度1100 kg/m³、内管与钻杆内壁的环空间隙5 mm、井底补流间隙1 m、钻杆内壁摩擦系数0.15计算,得到不同提升加速度下的钢丝绳最大负载如表1所示。

计算结果显示,提升启动阶段的钢丝绳负载在200 kN左右,钢丝绳的有效重力为钢丝绳负载的主要组成部分。为提高安全性,10000 m以深的深层段作业过程中,提升启动阶段的加速度以0.1 m/s²为宜,匀速提升速度不宜超过1 m/s。随着提升高度增加,钢丝绳自重逐渐减小,环空间隙增大,流体阻力也逐步降低,可缓慢将提升速度加大。基于上述分析,确定绞车的额定牵引力为200 kN。

2.3 主要技术参数制定依据

(1)出入缆速度0~3 m/s,控制精度0.02 m/s。裸眼段起升负载最大,孔壁安全是首要任务,要减少活塞效应,以安全为目标,提升速度不宜大,建议1 m/s左右,由孔底最深向上提升的过程中,随负载减轻,进入套管段,可增加速度,最快可达3 m/s(速度大小根据工程经验确定),以平均速度2 m/s计算,13000 m提升到孔口需要1.8 h。

控制精度为平均速度的1%,即0.02 m/s,在此

表1 不同加速度下钢丝绳负载

Table 1 Wire rope loads under different acceleration conditions

加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	有效重力(钢丝绳+内管总成)/kN	惯性力(钢丝绳+内管总成)/kN	压差阻力/kN	黏滞阻力(内管总成)/kN	黏滞阻力(钢丝绳)/kN	井斜摩擦力(内管总成)/kN	井斜摩擦力(钢丝绳)/kN	钢丝绳总负载/kN
0.1	157.2	1.86	13.9	0.07	3.6	0.68	7.34	184.65
0.5	157.2	9.30	18.5	0.09	3.9	0.80	7.53	197.32
1.0	157.2	18.60	20.5	0.10	4.0	0.86	7.61	208.87

注:有效重力=钢丝绳重力(181 kN)+岩心管重力(10 kN)-浮力(33.8 kN)。

精度控制下,打捞内管总成出钻台面钻杆内孔时其位置可准确控制,为钻台面机械手后续精准操作提供更好的条件。

(2)钢丝绳直径17.3 mm。国产2160 MPa钢级 $\Phi 17.3$ mm钢丝绳线重14.2 N/m,最小破断拉力285 kN,满足极限工况下额定牵引力200 kN的要求。

(3)额定提升力200 kN,最大提升力240 kN。如前所述,牵引绞车额定提升力设为200 kN,考虑到13000 m深孔时内管总成卡住无法提升的极端工况,内管总成设计有40 kN的安全销,最大提升力设计为240 kN,在极端工况下可拉断内管总成安全销,提出全部孔内钢丝绳,同时又不会拉断钢丝绳,钢丝绳尚有45 kN的安全余量。

(4)储缆量 ≥ 14500 m。孔深13000 m时,需配套钢丝绳长度不低于13500 m,考虑到储缆安全及钢丝绳余量要求,储缆卷筒最大容缆量 ≥ 14500 m。

(5)储缆绞车排绳张力4~12 kN。按照钢丝绳相关规范,钢丝绳在卷筒上缠绕时有合理张力范围。张力太小,钢丝绳在卷筒上排列不紧密,相互挤压易损伤。最小张力计算依据行业规范(如API 8C《钻井和修井用钢丝绳规范》)中关于“最小张力”的推荐值进行计算,通常为最小破断拉力的1.5%左右,圆整为4 kN。最大值由最大牵引力确定,最大提升力240 kN,通过牵引绞车(也称减张力装置)减张力后降至约12 kN,即为排绳时最大张力值。

(6)滑轮底直径 ≥ 900 mm。滑轮底直径选型依据国际标准ISO 4308和《起重机设计规范》(GB/T 3811—2008)进行确定,精密绞车系统滑轮底直径与钢丝绳直径的推荐比例 $\geq 40:1$,钢级越高滑轮底直径越大,考虑到钢丝绳选型达到2160 MPa钢级,结合整体结构尺寸要求,滑轮底直径确定为900 mm。

3 绳索取心绞车本体结构设计

3.1 总体结构

针对大深度绳索取心作业的苛刻条件,绞车系统必须满足超大容缆量、超高负载与长期可靠运行的要求。根据国内外绞车发展现状,由牵引绞车和储缆绞车组成的绞车收放系统在高质量排绳、精准控制等方面具有突出优点。以此为基础,研究制定了13000 m绳索取心绞车总体技术方案。绞车主体结构(图6)采用框架一体式设计,由框架、牵引绞车、松弛补偿器、排绳器、储缆绞车等组成。提升作业时,外部负重钢丝绳经导向轮进入牵引绞车,经减力后到达松弛补偿器,在排绳器精准往复移动下,从储缆绞车的滚筒下方有序缠绕到滚筒上。在前述主要技术参数制定依据的基础上,进一步确定总功率、润滑型式等其他主要技术参数,如表2所示。

3.2 主要部件设计与特点

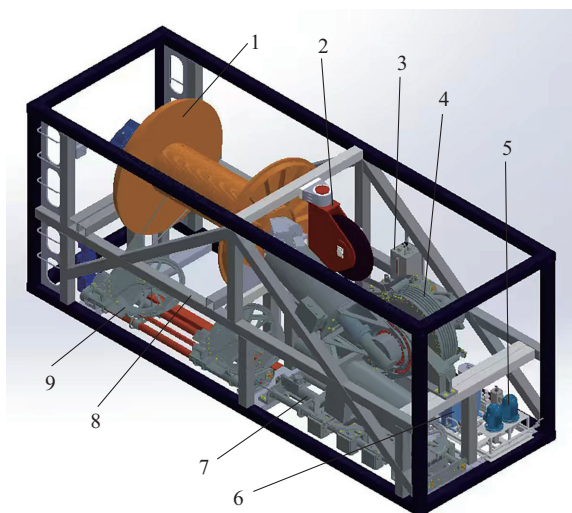
3.2.1 牵引绞车

牵引绞车(图7)由两个等直径的双牵引绞盘(图8)、电机、电机支架、直角行星减速器、轴承座和机架等装置组成,在绞车本体中的位置如图6所示,也被称为减张力装置,借助钢丝绳与滚筒绳槽之间的摩擦来传递运动和动力,类似于带传动,缠绕在绞盘上的钢丝绳形成了高张力边和低张力边,高、低张力边拉力符合欧拉公式^[17]:

$$F_1 = F_2 e^{\mu \alpha} \quad (2)$$

式中: F_1 ——高张力; F_2 ——低张力; μ ——钢丝绳与绳槽间的摩擦系数; α ——钢丝绳与绳槽的摩擦包角。

每绕一圈,高张力边与低张力边的比值增大 $e^{\mu \alpha}$ 倍,因此钢丝绳张力衰减只与钢丝绳摩擦包角 α 和钢丝绳与绳槽间的摩擦系数 μ 有关,与牵引绞盘的结构参数无关。经过计算,两个牵引绞盘上各缠绕



1—储缆绞车;2—导向轮;3—液压系统;4—牵引绞车;5—润滑系统;6—散热系统;7—松弛补偿器;8—绞车框架;9—排绳器

图6 绳索取心绞车结构组成

Fig.6 Structure of the wireline coring winch

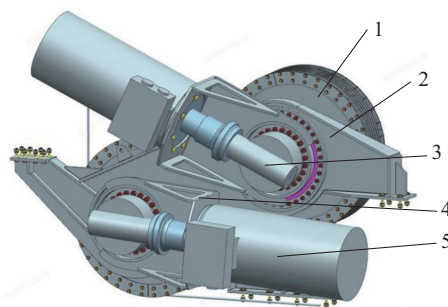
表2 主要技术参数

Table 2 Main technical parameters

参数项	参数值
出缆速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	0~180
额定牵引力/kN	200
排绳槽	Lebus
排绳张力/kN	4~12
钢丝绳直径/mm	17.3
滑轮PCD/mm	900
润滑型式	集中润滑
控制精度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.02
最大牵引力/kN	240
储缆量/m	14500
制动方式	驻车带刹+能耗制动
钢丝绳等级/MPa	2160
绞车框架型式	一体式框架
总功率/kW	440

5次钢丝绳,即可将出缆钢丝绳张力减至入缆钢丝绳张力的5%。

牵引绞车的两个牵引绞盘分别由两套电机与齿轮直角行星减速器驱动,需实现同步同向回转的实时精准控制。两个牵引绞盘之间是非刚性连接,通过设置主、从绞盘电机变频器的的工作模式,实现双电机的闭环同步控制。双绞盘共同驱动的牵引



1—牵引绞盘;2—机架;3—直角行星减速器;4—电机支架;5—牵引电机

图7 牵引绞车

Fig.7 Traction winch

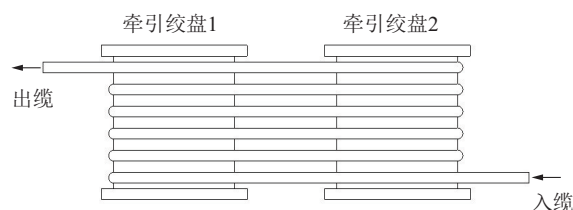


图8 双摩擦绞盘

Fig.8 Dual-friction winch

机构仅靠转速或位置同步可能导致负载分配不均,需引入负载分配策略,结合转矩反馈实现负载均衡控制。为实现带反馈、高精度且具有负载分配的闭环同步控制,需配置增量式编码器,采用“转速闭环同步+负载分配控制”策略。

主、从绞盘的闭环同步控制策略与逻辑:主站以转速指令为控制目标(如50 Hz),通过编码器反馈实现自身转速闭环控制;从站以主站的实际转速(而非指令转速)为跟随目标,同时通过自身编码器反馈计算转速偏差,动态调整输出频率,确保从站实际转速与主站一致;若需转矩均衡,可额外引入转矩反馈,使从站转矩跟随主站转矩变化。双电机主从驱动牵引机构的核心控制设备为两台变频器,本研究选用ABB ACS880系列变频器,该系列变频器作为高性能传动产品,支持多种同步控制方式。

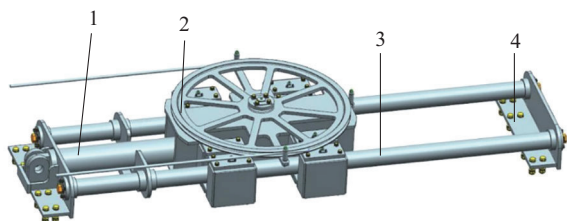
牵引绞车设有过载保护功能。选用的ABB ACS880变频器具有转矩控制功能:采用双闭环结构,外环为转矩给定与反馈比较环,内环为电流快速调节环。绞车可根据钢丝绳张力需求实时调整输出转矩,配合直径计算模块实现张力保护功能。根据钢丝绳最大安全工作拉力设计($F_{\max}=240 \text{ kN}$),当钢丝绳拉力达到该最大安全工作拉力时,双

牵引电机转矩总和 $M_{\max}$ ($M_{\max}=M_1+M_2$)达到最大,牵引电机变频器进入过载保护模式,即当负载超过20%额定值时,变频器自动进入限转矩状态并触发报警。该限转矩(张力)功能可确保在出现孔内异常卡阻时,保护钢丝绳不超过最大工作拉力而被拉断,这时系统输出限转矩(张力)报警,提示操作人员需要在释放拉力后,进入解卡阻程序作业。

3.2.2 松弛补偿器

松弛补偿器(图9)主要由支座、限位板、差动油缸、导轮、导轮移动框架、导向杆、拉线编码器、行程开关等组成,位于牵引绞车与排绳器之间的钢丝绳路径中,作为“张力缓冲器”,主动吸收因钻具抖动、速度变化等引起的钢丝绳张力突变和长度变化,维持经排绳器进入储缆绞车的钢丝绳张力保持在一定范围内,确保钢丝绳始终处于一个轻微的绷紧状态,从而杜绝“松绳”现象发生,并保护钢丝绳免受冲击。其主要执行机构为差动油缸活塞杆连接的动滑轮,沿着导轨做直线运动。

要实现恒张力控制,首先要解决钢丝绳张力的采集问题。如图10所示,通过在松弛补偿器油缸无



1—差动油缸;2—滑轮;3—导向杆;4—支架

图9 松弛补偿器

Fig.9 Slack compensator

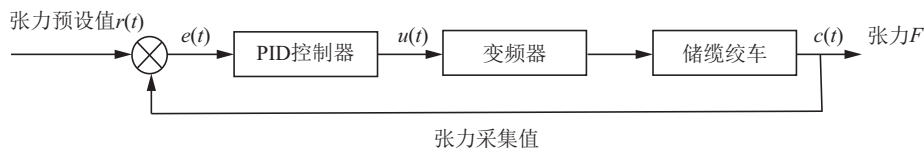


图11 控制流程

Fig.11 Control flow

3.2.3 排绳器

排绳器(图12)主要由交流变频电机、齿轮减速器、支座、丝杠、导向杆、排绳导轮、导轮移动框架、拖链、角度传感器、销轴张力传感器、接近开关、编码器、摄像头等组成,在绞车系统中的位置如图6所示,安装于储缆绞车滚筒前方,确保从松弛补偿器

杆腔设置压力传感器测压力 P ,可计算作用在活塞端的力 f ,进而可得钢丝绳拉力 F 。

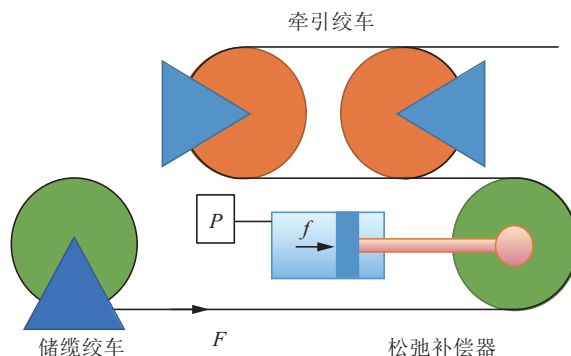


图10 钢丝绳张力的采集与控制示意

Fig.10 Schematic diagram of wireline tension acquisition and control

当绞车进行收放钢丝绳作业时,牵引绞车绞盘的工作半径恒定,而储缆卷筒的工作半径会随绞车收放钢丝绳而增大或减小。牵引绞车作为主动机构,储缆绞车需跟随配合牵引机构的线速度,根据储缆卷筒当前工作半径,确保在钢丝绳张力达到设定值时,储缆卷筒的线速度与牵引绞车的线速度一致。

恒张力闭环控制流程如图11所示,系统在钢丝绳上采集张力数据反馈给控制器进行偏差量自我修正,压力传感器采集的压力数据与压力给定值进行比较得出误差,按照误差利用PID控制器进行修正,使系统稳定运行,恒张力闭环控制系统具有较强的抗干扰能力。

过来的钢丝绳能够紧密、整齐、分层地缠绕在储缆绞车滚筒上。

排绳器由机械装置和控制单元两部分组成。导向杆两端设置两个非接触式磁感应式接近开关,用于检测排绳导轮是否到达卷筒的两端;丝杠由交流变频电机通过齿轮减速器驱动,带动排绳导

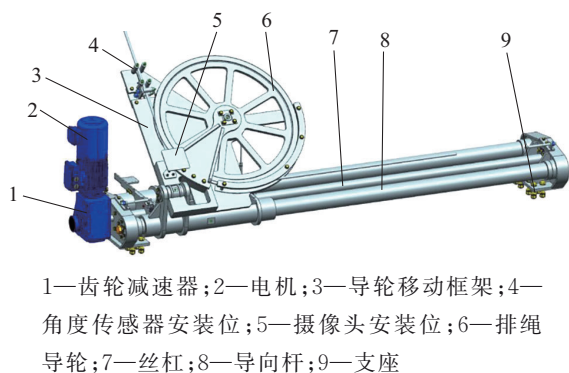


图 12 排绳器

Fig.12 Automatic rope arranging device

轮与框架往复移动;在驱动储缆绞车的电机上安装了光电式旋转编码器,检测储缆绞车滚筒运行转数,并将检测结果送至控制器,控制器根据算法得出钢丝绳在储缆绞车滚筒上的精确位置,发出控制信号启动交流变频电机旋转并带动丝杆转动,排绳导轮与框架移动并实时跟随储缆绞车滚筒运动。导轮移动框架上装有角度传感器,实时监测钢丝绳偏角,通过控制系统进行随动纠偏,同时通过摄像头实时观察排绳情况。

3.2.4 储缆绞车

储缆绞车(图 13)由电机、减速器、联轴器、储缆滚筒、轴承座、刹车机构等主要部件构成。储缆滚筒设计有 Lebus 绳槽,其特点在于绳槽的一周分为 4 段,2 段绳槽与卷筒轴线垂直,2 段绳槽是折线,在滚筒两侧分别设置有引导钢丝绳从第一层向第二层过渡的垫块。当钢丝绳发生缠绕时,上下两层钢丝绳在折线段交叉,在直线段上面的钢丝绳落在下面紧邻的两圈钢丝绳之间,通常情况折线段占滚筒周长 20%,直线段占 80%。采用 Lebus 绳槽可确保一开始缠绳时排绳整齐有序,为后续多层有序缠绳奠定基础;储缆滚筒一端设计有驻车高强带式刹车机构,用于停止状态下的安全制动,刹车鼓与储缆滚筒同轴,由油缸驱动,确保停车可靠制动。

3.2.5 稀油润滑系统

为确保牵引绞车与储缆绞车在重载、高速运行工况下的可靠润滑与有效散热,设计了稀油润滑系统(图 14)。电机驱动齿轮泵(浸入油箱中),将润滑油经过滤器精密过滤后,经环状管路输送至两个牵引绞车直角行星减速器和一个储缆绞车减速器,润滑后的油液经回油管路返回油箱。系统设置散热

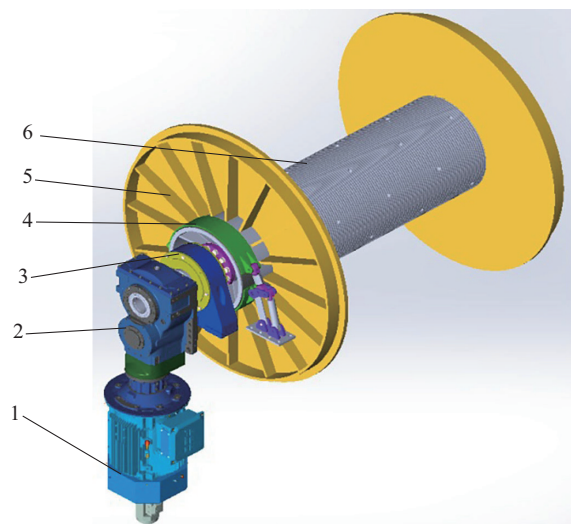


图 13 储缆绞车

Fig.13 Cable storage winch

器与温控阀对油温进行自动调节,确保油液始终处于最佳工作黏度。该系统控制集成于主 PLC 控制系统,通过润滑控制程序,实现减速器启动前预润滑、运行中连续润滑及停机后延时润滑。在上位机(HMI)界面可实时监控供油压力、温度、流量及过滤器状态,并设置压力、温度报警阈值。系统具备自适应调节功能,可根据实际工况与油温反馈,智能调节油泵输出与冷却强度,在保障充分润滑的同时实现节能运行。此设计实现了对关键传动装置润滑状态的持续监控,显著提升了系统可靠性与设备使用寿命。

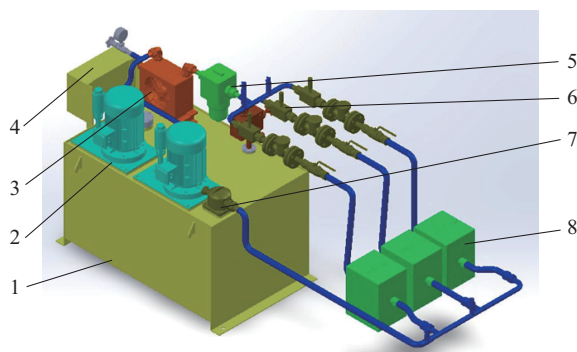
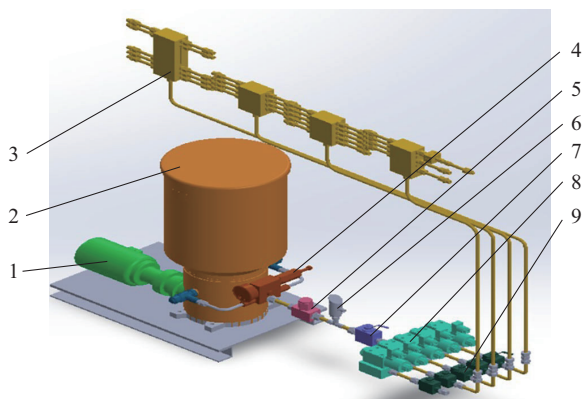


图 14 稀油集中润滑系统

Fig.14 Oil lubrication system

3.2.6 油脂润滑系统

针对传统手动加注易遗漏这一问题,设计了全自动单线递进式集中润滑系统(图15)。该系统由一台电动油脂泵站作为动力源,通过一条主干油管,连接至一系列递进式分配器。每个分配器根据预设的递进逻辑,将泵送的润滑脂按精确比例分配至其下游各个润滑点。油脂润滑系统的控制集成于绞车主PLC控制系统中,通过润滑控制程序,可实现对泵站的启停、润滑周期和每次供油持续时间的精确控制。上位机界面可设定并监控不同润滑点组的润滑间隔时间,并显示系统压力、泵站工作状态及故障(如堵塞、油位低)报警,实现预防性监控。



1—润滑电机与泵;2—油脂箱;3—递进式分配器;4—压力阀;5—过滤器;6—流量传感器;7—主路球阀;8—电气开关阀;9—分路球阀

图15 油脂集中润滑系统

Fig.15 Grease centralized lubrication system

4 绳索取心绞车控制系统设计

4.1 总体组成与结构

绞车电控系统结构如图16所示。系统由外部AC 380 V供电,电控系统的核心是绞车控制集装箱(VFD房),集成了PLC控制柜、VFD控制柜等,采用本地控制、钻机司钻房上位机集控和无线遥控三种控制方式。绞车各类传感器经本地控制箱接入系统,系统根据传感器信号控制各机构电机和电磁阀。

4.2 总体工艺流程

电控系统总体方案设计以精准控制、接口互联互通、人性化交互为目标,综合分析绞车多源信息采集输入、精准控制输出及与司钻房中央集控通信需求,采用模块化设计,形成司钻房集控系统、本地

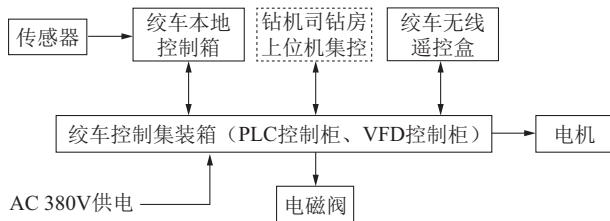


图16 绞车电控系统结构示意图

Fig.16 Schematic diagram of the electrical control system

上位机系统、无线遥控系统、下位机系统、多源信息采集系统、交流变频系统、能耗制动系统等子系统模块,具体功能实现如下。

(1)司钻房集控系统和本地上位机系统与下位机系统之间通过Profinet总线双向传输数据,实现参数设置输入、操控指令下发与传感数据显示、报警状态输出。

(2)多源信息采集系统将系统所有传感器检测数据分别以0~10 V模拟电压、4~20 mA模拟电流、高速脉冲、RS485串口数字等信号输出方式,经下位机A/D采集模块、数字输入模块等传输至下位机系统PLC寄存器,实现绞车传感数据与状态多源信息的采集输入,为绞车的精准控制提供条件输入。

(3)无线遥控系统通过无线接收器将无线遥控的操控开关和操作杆指令数据以Profinet总线数字输出方式接入下位机系统。

(4)交流变频系统与下位机系统之间、能耗制动系统与下位机系统之间通过Modbus总线进行双向通信,实现双向数据传输与闭环控制。

(5)采用工业通信接口和总线技术,将各子系统或模块互联、耦合,形成集本地、无线遥控和远程司钻房集控于一体的绞车电控系统,各子系统接口通信互联与耦合集成如图17所示。

4.3 基于Profinet的绞车总线通信网络设计

为实现绞车与钻机司钻房主控系统的一体化中央集成控制,绞车系统与钻机主控系统之间采用基于工业以太网技术的Profinet总线通信方式(图18),并使用UDP协议以提供低延迟的实时(RT)通信,适用于传感器、执行器和控制系统之间的高频数据交换,支持高速数据传输和低延迟,并基于标准以太网,可支持多种拓扑结构和网络设备,具有很高的兼容性和集成性。

无线接收模块安装于绞车本地电控箱内,与下

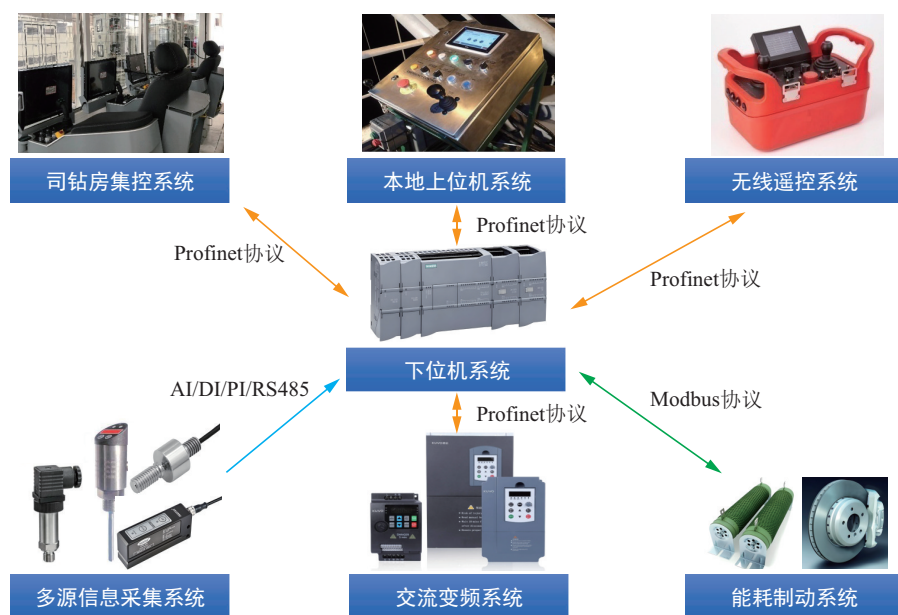


图 17 各子系统通信互联与耦合集成示意

Fig.17 Interconnection schematic of subsystems

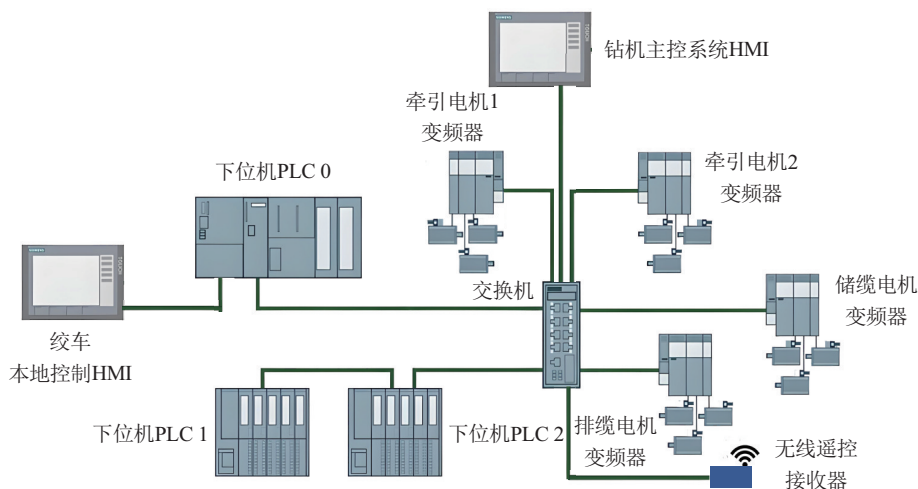


图 18 Profinet通信网络拓扑图

Fig.18 Profinet network topology

位机PLC通过Profinet总线双向通信实现操作指令输入采集及传感数据输出显示。

5 结论与展望

(1)简要分析了万米深孔绳索取心提升过程中钢丝绳受力情况,通过采用数值仿真方法初步得出了超万米深井绳索取心钢丝绳负载特征。建议10000 m以深的作业过程中,提升启动阶段的加速度以 0.1 m/s^2 为宜,匀速提升速度不宜超过 1 m/s 。随着提升高度增加,钢丝绳自重逐渐降低,环空间

隙增大,流体阻力也逐步降低,可缓慢提高提升速度。

(2)在万米深井绳索取心钢丝绳负载特征分析的基础上,确定了13000 m钻深的绳索取心绞车主要技术参数,完成了绞车总体设计。介绍了牵引绞车、储绳绞车、排绳器、松弛补偿器、电控系统等绞车主要部件的结构特点并分析其工作原理,预期可满足13000 m钻深绳索取心工艺安全、高效、精准控制的需求。

(3)下一步主要工作是投产试制,做好厂内软

硬件调试、优化改进及台架试验,与主机进行集成联调联试,为即将实施的超深井钻探工程提供重要技术装备支撑。

参考文献(References):

- [1] 张金昌,刘秀美.13000 m科学超深井钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):1-6.
ZHANG Jinchang, LIU Xiumei. 13000 m drilling technology of super depth scientific drilling-well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9): 1-6.
- [2] 张恒春,胡郁乐,陈福练,等.松科2井6500 m绳索取心绞车研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(S1):209-212.
ZHANG Hengchun, HU Yule, CHEN Fulian, et al. Development of a 6500-meter wire-line coring winch for Songke Well 2[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(S1): 209-212.
- [3] 古卫鹏,刘凡柏,张金昌.绳索取心绞车技术发展综述[C]//第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流会论文集.哈尔滨:中国地质学会探矿工程专业委员会,2015:93-99.
GU Weipeng, LIU Fanbai, ZHANG Jinchang. Review of advances in wireline coring winch technology[C]//Proceedings of the 18th Annual National Technical Exchange Meeting on Exploration Engineering (Geotechnical Drilling and Tunneling Engineering). Harbin: Technical Committee of Exploration Engineering, Geological Society of China, 2015: 93-99.
- [4] 何磊,沈怀浦,杜江.YSJ3000型深孔绳索取心液压绞车的研制[J].地质装备,2011,12(1):14-16.
HE Lei, SHEN Huaipu, DU Jiang. The design of YSJ3000 hydraulic winch for deep wireline coring[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2011, 12(1): 14-16.
- [5] 潘飞,藏臣坤,孙军盈,等.DB4000型变频电动绳索绞车的研制与应用[J].地质装备,2014,15(2):11-14.
PAN Fei, ZANG Chenkun, SUN Junying, et al. Development and application of DB4000 type variable frequency electric rope winch[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2014, 15(2): 11-14.
- [6] 高明帅,孙军盈,沈怀浦,等.4000 m地质钻探电传动自动排绳取心绞车研制[C]//第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流会.西宁:中国地质学会,2019:393-400.
GAO Mingshuai, SUN Junying, SHEN Huaipu, et al. Development of electric coring winch with automatic rope winding for 4000 m geological drilling[C]//The 20th Annual Academic Exchange Meeting on Exploration Engineering (Geotechnical Drilling and Tunneling Engineering). Xining: Geological Society of China, 2019: 393-400.
- [7] 张惠,刘狄磊,罗光强,等.绳索取心绞车多功能装置研究[J].煤矿机械,2012,33(8):157-159.
ZHANG Hui, LIU Dilei, LUO Guangqiang, et al. Research of rope coring winch multi-functioning device[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(8): 157-159.
- [8] 刘狄磊,李晓磊,徐清.绳索取心绞车排绳器关键问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(5):57-61.
LIU Dilei, LI Xiaolei, XU Qing. Research on key problems in rope-arranging device for wire-line core winch[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(5): 57-61.
- [9] 任启伟,刘凡柏.3500 m岩心钻探装备绳索取心绞车自动排绳器的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013(S1):61-64,72.
REN Qiwei, LIU Fanbai. Development of the automatic rope arranging device for the drawworks of 3500 m core drilling equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013(S1): 61-64, 72.
- [10] 胡郁乐,喻西,张惠,等.6000 m用取心绞车电液控制及辅助监测系统设计[J].矿山机械,2016,44(2):31-34,41.
HU Yule, YU Xi, ZHANG Hui, et al. Design of electro-hydraulic control and auxiliary monitoring system of coring winch for drilling of 6000 m[J]. Mining & Processing Equipment, 2016, 44(2): 31-34, 41.
- [11] 任启伟,刘凡柏,高鹏举,等.基于PLC的绳索取心绞车智能控制系统研究[C]//第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流会论文集.西宁:中国地质学会,2019:367-377.
REN Qiwei, LIU Fanbai, GAO Pengju, et al. PLC based intelligent wire line core drilling winch control system[C]//Proceedings of the 20th National Annual Conference on Exploration Engineering (Geotechnical Drilling and Tunneling Engineering). Xining: Geological Society of China, 2019: 367-377.
- [12] 李小青,余森,沈祖英,等.数字化智能排绳器的设计[J].工矿自动化,2014,40(5):81-84.
LI Xiaoqing, YU Miao, SHEN Zuying, et al. Design of digital intelligent rope guider[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(5): 81-84.
- [13] 吴来杰,严隽薇,江进国.基于单片机的智能排绳控制系统[J].机电一体化,2008,14(6):75-78.
WU Laijie, YAN Juanwei, JIANG Jinguo. A intelligent control system based micro-computer of winch ropealigning device[J]. Mechatronics, 2008, 14(6): 75-78.
- [14] 熊运昌,陈红毅,杨荣卿.绞车排绳运动分析与控制[J].矿山机械,2010,38(21):51-54.
XIONG Yunchang, CHEN Hongyi, YANG Rongqing. Motion analysis and control of aligned ropes of winch[J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(21): 51-54.
- [15] 任启伟,刘凡柏,高鹏举,等.5000 m绳索取心绞车设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):46-52,57.
REN Qiwei, LIU Fanbai, GAO Pengju, et al. Design of 5000 m wireline coring winch[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4): 46-52, 57.
- [16] 胡郁乐,张惠,王稳石.深部岩心钻探关键技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2018.
HU Yule, ZHANG Hui, WANG Wenshi. Key Technologies for Deep Core Drilling[M]. Wuhan: The Press of the China University of Geosciences, 2018.
- [17] 翟庆光,聂杰,康岳伟.深海取样绞车牵引卷筒上钢缆张力分析[J].海洋技术,2008,27(2):28-30.
ZHAI Qingguang, NIE Jie, KANG Yuewei. Analysis of wire line tension on traction drum of deep sea sampling winch[J]. Ocean Technology, 2008, 27(2): 28-30.

(编辑 王跃伟)