

石油钻机绞车变频控制系统控制联锁与操作安全研究

姚瑶¹, 马亚峰², 侯忠奎², 安建钧², 解晓勇³, 段继国²

¹中国石油宝石管业有限公司, 陕西 宝鸡

²宝石电气设备有限责任公司技术部, 北京

³陕西拉普达华油钻采设备有限公司技术部, 陕西 宝鸡

收稿日期: 2026年6月16日; 录用日期: 2026年7月8日; 发布日期: 2026年7月17日

摘要

本文以ZJ90DB型石油钻机为研究对象, 结合绞车电机特性与游车系统安全性要求, 系统阐述了绞车变频控制系统的操作流程与安全程序设计要点, 并对全自动化钻机中的安全联锁机制进行了详细说明。最后, 对绞车操作与程序设计中需遵循的安全规范进行了总结, 为钻机电控系统的安全运行提供理论依据与实践参考。

关键词

钻井绞车, 变频控制, 安全联锁, 人机交互, 自动化测试

Research on the Control Interlocking and Operation Safety of Frequency Conversion Control System in Oil Drilling Rig

Yao Yao¹, Yafeng Ma², Zhongkui Hou², Jianjun An², Xiaoyong Xie³, Jiguo Duan²

¹CNPC Baoji Petroleum Pipe Industry Co., Ltd., Baoji Shaanxi

²Technology Department, BOMCO Electric Equipment Co., Ltd., Beijing

³Technology Department, Shaanxi Lapuda Mechanical and Electrical Technology Co., Ltd., Baoji Shaanxi

Received: June 16, 2026; accepted: July 8, 2026; published: July 17, 2026

Abstract

This paper takes the ZJ90DB type oil drilling rig as the research object, and combines the

文章引用: 姚瑶, 马亚峰, 侯忠奎, 安建钧, 解晓勇, 段继国. 石油钻机绞车变频控制系统控制联锁与操作安全研究[J]. 动力系统与控制, 2026, 15(3): 266-273. DOI: 10.12677/dsc.2026.153027

characteristics of the winch motor and the safety requirements of the traveling car system, and systematically explains the operating process and safety program design points of the winch frequency conversion control system, and provides detailed explanations on the safety interlocking mechanism in the fully automated drilling rig. Finally, the safety specifications that need to be followed in winch operation and programming are summarized, providing theoretical basis and practical reference for the safe operation of the drilling rig electrical control system.

Keywords

Drilling Winch, Variable Frequency Control, Safety Interlock, Human-Computer Interaction, Automated Testing

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 综述

绞车作为石油钻机的核心设备，其电气传动控制系统不仅需具备高响应速度、高可靠性与安全性，还须注重操作的便捷性及人机界面的友好性[1]。变频驱动的绞车控制系统要求司钻人员在充分了解绞车控制特性并严格遵循操作规程的前提下，方可安全进行启停、提升、下放及钻具更换等操作。具有一定自动化程序处理功能的石油钻机司钻控制系统已经得到了初步应用[2]。

但是当前的以绞车为核心的司钻操作控制系统还有明显的短板[3]。

(1) 操作依赖人工经验：尽管有标准化尝试，但部分现场仍依赖“经验操作”，工具准备、人员配合不同步等问题仍可能导致延误或风险。

(2) 安全管理体系执行不一：众多企业存在“重效益、轻安全”现象，安全标准落地效果参差不齐，监管力度不足，监管覆盖不了全部技术层面。

(3) 自动化技术缺乏统一规划：不同厂家的操作系统五花八门，技术和安全漏洞较多。

本文以 ZJ90DB 钻机绞车变频传动控制系统为例，系统介绍其操作步骤、安全注意事项及控制系统中安全联锁的设计要点，为钻机绞车控制系统提出设计与操作方面的安全措施要求，扩展到整个司钻操作系统的安全保护功能，并讨论了自动化司钻系统的应用事项[4]。

2. 基于触摸屏的绞车安全操作

现代钻机控制系统广泛采用高集成度 HMI 界面，实现操作引导、状态监控、连锁保护、误操作保护与故障诊断一体化，通过对所有故障及误操作进行画面提示并归档，为故障诊断提供可视化数据支持，同时还可能进行预测性维护指导。通过可视化实时数据与智能提示，显著降低了司钻的操作负担与误操作概率[4]，见图 1。

2.1. 系统初始状态自检

系统上电后自动执行自检程序，检测气路液路状态、盘刹状态、齿轮箱状态、变频器使能信号、风机运行状态等关键参数。自检未通过则禁止后续操作，并在触摸屏上明确提示故障信息与处理建议。

2.2. 选择绞车单/双电机工作模式

绞车默认采用“双电机”模式。若 DWA 或 DWB 变频驱动系统中任一出现故障，须首先确认单电机

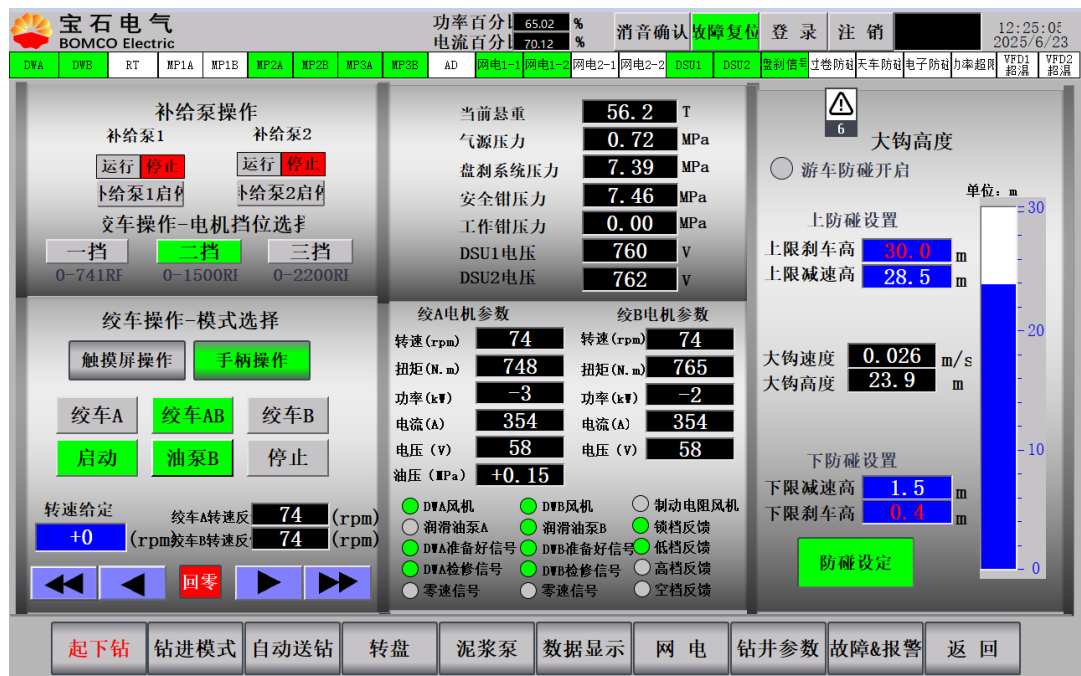


Figure 1. HMI for drilling operation

图 1. 司钻操作人机界面

具备拖动负载并留有 10%以上余量的能力，否则应启用自动送钻系统进行安全作业。自动送钻系统不但是绞车系统的应急驱动系统，有能力拖动最大钻具重量，而且还可按恒钻压、恒泵压、恒顶驱扭矩、恒转速模式作业。

绞车模式切换须在变频器未使能状态下进行。若在运行中误操作切换模式，系统将立即终止运行指令，取消使能信号，执行刹车、停风机等操作，并在 HMI 界面提示报警信息。

2.3. 选择绞车机械档位

根据负载与钩速需求，通过自动换挡开关选择高速或低速机械档位，确认挂挡并锁档后方可操作。控制程序实时检测挂挡与锁档信号，若未获取到相应反馈，或者档位误操作则禁止绞车运行，并在触摸屏提示警告信息。

程序设计须依据悬重判定机械档位和电气档位选择是否正确，同时根据机械减速比对绞车最大钩速和最大钩载做保护设计，避免超速或超钩载^[1]。

2.4. 选择绞车电气档位

为提高运行效率并保障安全，HMI 界面设有四个电气档位。程序默认设置为 1 档。司钻可根据当前钩载手动选择四个电气档位中的一档，若司钻选择过高档位致使提升力不足，系统将根据悬重数据自动处理，自动设置到合适的档位，即自动降档并发出提示。但是程序不做出自动升档的处理。

2.5. 启动绞车电机

启动绞车主电机时，主电机冷却风机和润滑油泵先运行，待绞车变频器启动控制逻辑中各逻辑指令状态正确后，绞车逆变器启动并有电流输出，电机建立励磁。当绞车变频器使能后，通过 PROFINET 通讯将绞车变频器的相关状态传递给 PLC，控制点亮司钻台上“绞车运行”绿色指示灯或在 HMI 触摸屏中

显示绞车变频器运行状态,此时表明电机启动完成。注意此电机启动完成之前不要操作绞车给定手柄。

电机启动完成后表示电机做好了驱动负载的准备,在盘刹未释放前,钩载负荷仍然在盘刹上,电机处于空载“0 速度”状态,此时还不是“悬停状态”。

电机启动完成后松开盘刹,钩载负荷自动转移至电机,电机拖动负荷处于“悬停状态”,行业内习惯称作“电机悬停”。“电机悬停”是高性能变频控制系统的一种特殊的运行状态,变频器处于运行并输出电流,由电机独立拖动位势性负载不动(盘刹处于释放状态),电机不是处于停止状态而是处于运行状态,操作者要清楚这一点。

无论是矢量控制还是直接转矩控制均可以实现悬停功能,电机悬停状态下电机转子能够长时间静止不动,电机同步旋转磁场旋转出与负载转矩反方向且相等的负载转差从而输出提升方向的拖动转矩。此时按照矢量控制理论,电机既输出励磁电流,又输出转矩电流,定子电流为低频交流(频率为转差频率)。另外还有一种 0 速度状态,例如非位势性负载的泥浆泵处于 0 速度,变频器仅输出励磁电流而不输出转矩电流,定子电流是一种特殊的脉冲直流状态,仅是保持电机励磁恒定,电机不旋转。二者是有区别的。

一般情况下绞车电机应配置编码器,使转子磁场定向准确,否则在悬停状态下会出现缓慢溜钩现象。编码器是关键部件、低电压信号器件,又是易损部件,所以设计系统时要做好抗干扰措施,同时要设计外罩防护,避免外部机械碰撞损坏。目前已经有变频器厂家开发了无编码器悬停功能,且已经成功在港口吊机应用,但还没有推广到石油钻机绞车。

悬停是一个特殊的控制状态,电机通过控制技术实现了带负载的静止状态,理论上悬停状态可以持续无限长时间,安全可靠。即使控制故障或停电造成电机失电,控制程序会控制盘刹自动刹车,能够保证系统的安全。但是实际工作中,一般要求电机不转动超过 5~10 分钟后,应停止电机,变频器启动,盘刹刹车,钩载负荷自动转移到了盘刹。这样处理的目的一是提高系统的安全性;二是降低电机能耗。原因是在电机处于悬停状态时刹住盘刹而变频器保持使能状态,钩载负荷不能自动转移到盘刹,变频器仍然输出转矩电流,大钩负载仍由电机承担。

带编码器可以使悬停、电气减速制动过程更精准,并有效的抑制溜钻现象,减少对盘刹的冲击,延长盘刹制动片的使用寿命。

2.6. 绞车运行

在电机拖动负载处于“悬停状态”后,手柄垂直时是零位,手柄输出速度指令为 0 rpm。操作绞车(速度给定)手柄就可以提升或者下放游车。手柄回拉绞车上提,手柄前推绞车下放。

操作绞车前,根据实际钩载选择合适的电气档位。在不同的电气档位,手柄角度最大位置对应的当前档位的最大钩速,推拉手柄角度与电机速度成线性关系,钩速完全决定于手柄指令,这是速度闭环控制的“硬特性”。

控制程序中设置电子防撞系统默认状态为开启,严禁随意关闭电子防撞系统。如遇特殊情况需要人为关闭电子防撞系统,操作需要操作权限密码,后台上位机记录操作信息并归档。同时控制程序控制操作系统选择电气 1 挡(最低档),如果司钻选择其它电气挡位,系统会自动退档至电气 1 档,触摸屏上即刻显示“电子防撞已关闭”的警告信息,直至“开启电子防撞系统”。

2.7. 绞车电机停机

绞车手柄回零,变频器给定立即为零,但变频器控制需要经过一个完整的减速过程,电机速度才能自动减速到零。待电机速度回零后,电机处于悬停状态,先刹住盘刹,再将绞车“停止/运行”转换开关扳至“停止”位置或操作 HMI 触摸屏的绞车停止按钮,电机风机和绞车润滑油泵自动停止,绞车逆变器

去使能、停止电流输出,电机断电,钩载转移至盘刹,完成绞车电机的停机控制。

注意电机速度没有回零之前,切勿操作绞车盘刹刹车,否则会造成电机堵转和绞车变频系统过流或过压故障,严重时会造成盘刹和游动系统。

2.8. 起升下放井架底座

起升或下放井架底座,一般应使用主电机(双电机),机械档位 I 挡,电气档位 1 挡。起升或下放井架底座时,激活 HMI 触摸屏画面的“起升下放井架底座”按钮,控制程序将给定手柄摆角最大对应的电机速度限制在 30%该档位下电机额定转速以下。

特殊情况下(需要与钻机厂核实提升能力),可以采用自动送钻起升或下放井架底座,选机械档位 I 挡,当自动送钻电机带编码器时,电机速度可以控制在额定转速下任何值;当自动送钻电机不带编码器或编码器有问题时,电机转速应工作在 200 rpm 以上,避免工作在 5 Hz 以下。

2.9. 传动急停和失电抱闸保护

只要绞车电机风机在运转、变频器处于使能状态,无论是电机悬停还是转动,绞车都处于运行状态,此时电子防碰系统(电子防碰不关闭)和故障安全抱闸系统都处于准备工作状态。在绞车运行时,按下电控操作台传动急停按钮或者盘刹系统的盘刹急停按钮,PLC 都会自动停止绞车变频器运行,同时给出盘刹刹车信号,工作钳和安全钳自动抱闸。绞车正在运行时如果变频系统发生故障,电机失电,PLC 会自动获取变频器故障信息,给出盘刹刹车信号,工作钳和安全钳自动抱闸,保证系统运行安全和设备安全。自动送钻运行时同样有类似绞车运行的相关保护。自动送钻运行和主电机绞车运行之间设置互锁关系,仅允许其中之一带钩载运行。

控制程序应对传动急停和失电抱闸做相应试验程序,并要求定期对其功能进行检查,一般要求司钻定期(一般不超过 1 周,HMI 设置试验周期)试验一次该保护功能。如果司钻不按要求定期试验,程序应做如下处理:距预设试验周期剩 1 天时开始警告提醒“距绞车传动急停和失电抱闸试验预期试验周期仅剩 1 天”,如果在剩余时间内还未进行相关试验,触摸屏上进一步警告提示“绞车传动急停和失电抱闸试验超时”,并且待本次绞车运行结束之后,禁止绞车变频器再次启动。只有按要求测试完绞车传动急停和失电抱闸试验,控制程序才允许绞车或自动送钻正常工作。

绞车操作系统也有电子防碰控制系统,电子防碰系统的有效性也需要定期进行试验,最短的试验周期为一班一次,最长的试验周期为一周一次。

2.10. 绞车盘刹刹车能力有效性测试

为了确保绞车盘刹系统可靠性和安全性,需要定期检测盘刹的控制功能或刹车能力。测试时要求大钩断开负载,游车处于低位。在绞车工作一周左右后,需要监测工作钳和安全钳的控制及出力是否有效。在盘刹急停和驻车制动前提下,在触摸屏上启动盘刹测试按钮进入盘刹刹车测试状态,绞车变频器自动启动并自动缓慢加速监测刹车工作钳和安全钳压力是否变化、绞车扭矩值、滚筒是否有移动。当电机扭矩达到测试扭矩限定值后保持 1 分钟,绞车滚筒无位移即为盘刹测试通过,否则判定测试失败,测试失败后检查盘刹系统问题并处理后需要再次测试,直至测试通过。给定最大速度值一般在额定值的 5%以内可调,加速时间在 5~20 s 内可调,测试扭矩限定值设置为额定扭矩 60%以内可调。此功能主要是测试盘刹系统的刹车有效性及可靠性,并不是测试其最大制动能力,所以通过测试扭矩限定值不需要设定到 100%。

通过盘刹测试,可以提高系统预维护功能并提示关键部件检修或更换,避免出现意外故障,见图 2。

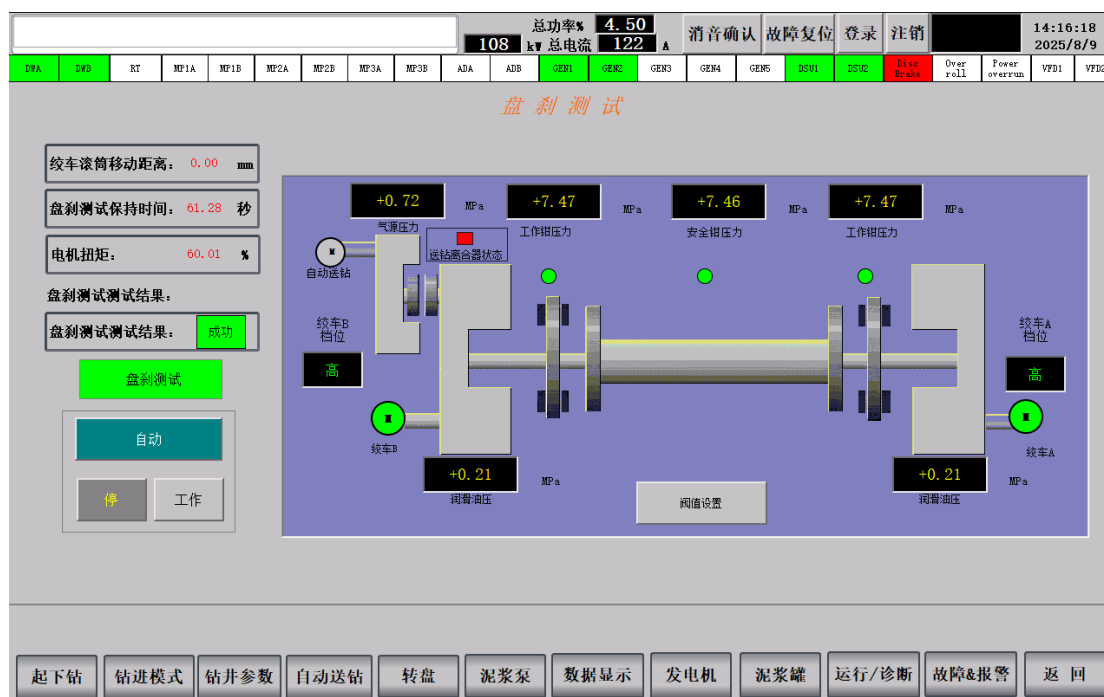


Figure 2. HMI for disk brake

图 2. 盘刹刹车功能测试人机界面

3. 绞车控制系统与顶驱、井口自动化工具的安全联锁

现在石油钻机普遍采用交流变频控制系统，顶驱、井口工具及钻机电控系统集成化系统化设计，以高性能 PLC 与触摸屏为基础，形成全自动化司钻控制，主司钻操作钻机，副司钻操作井口工具，实现绞车、顶驱、铁钻工、机械手等设备的协同控制与主动防碰[5]。

全自动化系统增强了信息协同，简化了系统配置，方便了司钻操作，减少了人员配置，增强了人员与设备的安全。具体设计各厂家各有思路，但总体上有以下的保护连锁功能：

(1) 绞车与顶驱之间设置立体防碰区域，实时检测游车与顶驱(包含顶驱吊环等)的相对位置，超出安全范围即保护；

(2) 铁钻工与游车的防碰保护，一般采用主动躲避策略。铁钻工上位时限制游车行程，游车在井口位置时铁钻工不允许上位等；

(3) 二层台机械手、管柱机械手、顶驱、铁钻工、自动化猫道之间的衔接与防碰；

(4) 触摸屏可视化实时显示各个设备的运行状态、数据、位置、报警信息等(见图 3)，给司钻工提供一个直观、方便、全面、安全、友好的操作界面，基本上能做到按照不同工况一键式自动运行，不需要过多人为操作；

(5) 全自动化系统编程调试复杂，涉及多家工厂的不同产品，需要逐项单独调试，再进行联合调试，要逐个功能试验，反复验证程序的正确性、完善性及安全性。另外每个设备都有就地和远程两种操作方式，以便在特殊工况下各设备可以手动独立操控，保证系统的可靠性和灵活性。自动化钻井系统的功能及安全性需要在钻机现场进行持续的试验与改进，逐步做到性能完善和全面的安全防护。

4. 绞车控制功能与操作安全事项总结与展望

绞车变频控制系统的性能好坏决定了电机控制性能指标，而 PLC 操作控制作为程序化管理系统，

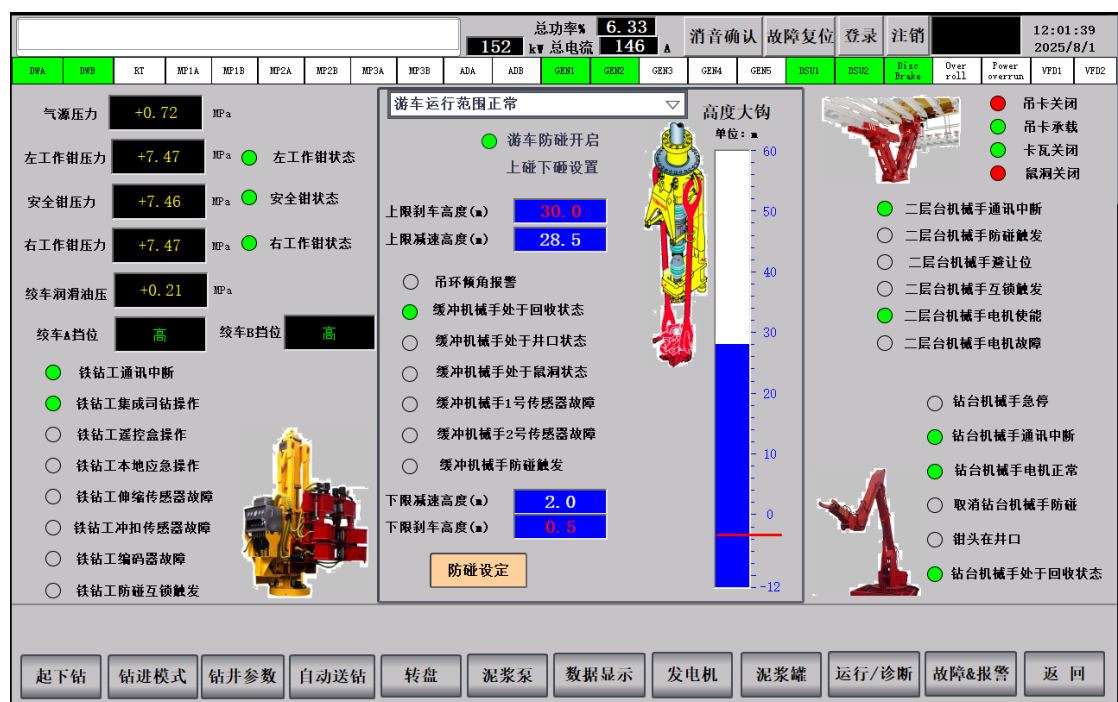


Figure 3. HMI for drawworks operation with safe interlock
图 3. 绞车安全连锁人机界面

应与变频系统配合精准，编程完善监管到位，人机交互界面友好。

(1) 设计者应对变频控制系统的矢量控制和速度闭环特性具有较好的理解，合理设置参数，实现优良的运行特性和完善的安全保护，且人机界面友好。电气上还应具备足够的抗干扰能力，实现高可靠性；

(2) 操作者应对变频控制系统特性具有一定程度的理解，熟悉相关按钮开关的功能和操作，熟悉画面各项数据并理解其含义，能根据实际工况需要选用合适的操作方式，严格遵守电气操作规程，并具有应急处理能力；

(3) 绞车档位选择须依据悬重合理选择，程序设计应实现全面监控与保护；

(4) 控制程序应要求定期对急停与故障保护功能试验，并具有强制性；

(5) 所有程序的误操作保护、安全连锁等功能，均要在触摸屏上予以提示、解释并给出解决措施，禁止无任何提示的电气封锁与保护，且需要记录操作数据。

在当前数字化信息化智能化快速发展的情形下，以下几个方面是比较重要的方面：

(1) 构建数字化安全监控体系：通过传动与自动化系统采集所有的运行数据，增加适当的传感器实时监测振动、温度、压力等机械或工艺参数，总结吸纳专家系统技术数据进入控制系统，建立相应的设备故障模型或者故障生成要素，实现设备的预测性维护提示与要求，自动维修提示直接给出技术指导，并具有一定的强制性。

(2) 强化人员培训与行为识别：采用 VR 模拟应急场景，结合 AI 识别不安全操作。

(3) 完善应急预案与冗余设计：确保主系统故障时仍能活动钻具、解卡或紧急提升。

总而言之，石油钻机绞车安全操作应从被动响应向主动预防转型，技术普及、维护措施、管理落地和人员能力仍需同步提升，才能全面降低事故风险。

(4) 具备条件时在司钻控制系统中引入人工智能控制策略，对设计、操作、安全进行全方位的管理监控[6]。

参考文献

- [1] 何培洪, 李龙建, 何志波, 等. 石油钻机绞车变频控制系统的钩速选定及制动能力计算[J]. 电气传动自动化, 2024, 46(4): 8-12.
- [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] 于兴军, 宋志刚, 魏培静, 等. 国内石油钻机自动化技术现状与建议[J]. 石油机械, 2014, 42(11): 25-29.
- [4] 安建钧, 李西方, 张鹏飞, 等. 采用国产变频器的 ZJ90DB 石油钻机电传动系统[J]. 电气传动自动化, 2021, 43(6): 13-17.
- [5] 白尚懿, 杨小亮, 何生兵, 等. 自动化钻机管柱处理系统研究现状与发展趋势[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(5): 203-207.
- [6] 李靖, 高艳坤, 孔祥伟. 石油钻机自动化智能化技术研究及发展建议[J]. 中国设备工程, 2020(3): 43-44.