

[控制系统]

基于网电的预制舱式智能大功率变频钻机电控系统研究

文/左 涛¹ 李 敏² 朱西平³ 吴晓林¹

1. 乐山一拉得电网自动化有限公司; 2. 乐山师范学院; 3. 西南石油大学

研究了一种基于网电的, 通过改变电动机供电电源频率和电压来调节电动机转速的预制舱式智能大功率变频钻机电控系统, 分析了石油开采工作中对该系统的功能性能需求, 并进行了开发和设计, 最后通过技术指数增长模型, 对该电控系统的技术生命周期及成熟度进行了分析。

石油钻井机是石油开采过程中的主要工具, 对其动力及控制系统技术的完善和改进, 不但能够提高钻井的开采效率和石油资源的开采量, 还能降低能源消耗, 减少开采成本。迄今为止, 石油钻井机控制系统技术已经历三代: 第一代是柴油机并车驱动石油钻井机的控制系统, 在该系统中以柴油机作为总动力, 能量消耗高, 废气排放多, 噪声污染大, 维护成本高; 第二代是直流电动机并车驱动石油钻井机的控制系统, 在该系统中以网电或柴油发电机组作为总动力, 功率因数低, 控制精度低, 维护成本高; 第三代是三相交流变频调速异步电动机并车驱动石油钻井机的控制系统, 在该系统中以网电作为总动力, 功率因数和控制精度高, 结构简单, 安全可靠, 维护成本低。

近年来, 随着石油行业“低碳环保、节能减排”理念的深化, 以及电力技术的快速发展和电动机控制的日趋自动化, 石油开采所需能源供给逐步向“油改电”“电代油”的趋势发展, 因此以国家电网电能替代柴油发电机组向三相交流变频调速异步电动机提供电能, 以三相交流变频调速异步电动机作为石油钻井机的动力机已成为石油钻井机控制系统技术发展的必然趋势, 拥有广阔的市场前景和发展空间。

本文研究了一种基于网电的预制舱式智能大功率变频钻机电控系统(见图1), 分析了石油钻井作业中对该系统的性能需求, 并根据这些需求在该系统的转场便捷性、环境适应性、系统集成化、电动机智能控制和抗干扰能力等方面进行了开发和设计。

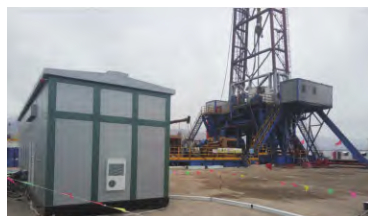


图1 应用于石油钻井作业现场的基于网电的预制舱式智能大功率变频钻机电控系统

变频钻机电控系统的需求分析

通过对石油开采工作中变频钻机电控系统的功能性能需求进行分析, 确定项目研发的目标, 突出项目研发的重点, 攻关项目研发的难点, 形成具有创新性和实用性的项目研发成果。

1. 转场便捷性需求

目前, 应用在石油开采现场的三相交流变频调速异步电动机的电控系统, 大多以单体柜形式放置在配电房内, 由于石油钻井位置并不固定, 根据实

际情况需要经常转场作业，作业地点一般地处偏远地带，往往现场施工条件差，运输路况差，而且施工时间紧，工作量大，对于修建配电房放置电动机电控系统的方式并不适合当今石油开采的现实需求。因此，需要采用预制舱式产品设计，将系统设备统筹安装在一台可移动预制舱体内，从而方便转场作业，减少转场工作量，缩短转场工期。

2. 环境适应性需求

系统设备要考虑环境的适应性问题，无论是机械还是电气设计，都要考虑环控、防尘、防雨和防潮措施，考虑结构的安装拆卸的方便性，考虑维护的方便性。当前应用在石油开采现场的预制舱式产品的舱体大多采用环控性能差的钢结构电控箱房，由于金属钢结构箱房存在耐化学性能差、易锈蚀、高寒低温下易脆断、热导率高和耐火性能差等缺点，加之环控性能差，使得这种设备形式不论机械性能还是电气性能都无法承受高温、高湿、严寒、风沙、凝露和污秽等严酷自然环境的考验，无法满足系统设备环境适应性的需求。因此，需要研究设计一种非金属形式且配备良好环控系统的预制舱来替代金属结构的电控箱房。

3. 系统集成化需求

目前，石油开采现场的电控箱房与电网变电站大多各自独立配置，不仅占地面积大，运输安装工作量大，而且安全可靠性能差，维护工作量大。因此，需要研究设计一种能将电控箱房与电网变电站功能合二为一且高度集成化的系统设备。

4. 系统智能控制需求

系统的核心是基于可编程序控制器（PLC）控制的智能大功率变频电动机控制系统，该系统的控制部分规模庞大，涉及内容复杂，具有高运算速度、高性能、开放性、安全性和时效性好的特点，具备较强的扩展功能、连接能力和开放的通信协议通道，具有测量数字化、控制网络化、状态可视化、功能一体化和信息互动化特征。系统的变频电动机控制部分应为模块化，可实现功率单元互换和扩容，同时实现四象限运行，能够快速响应指令，具有良好的过载能力，具有远程监测和历史数据保存功能，能方便石油钻井现场工作人员及时掌握现场运行状态。

5. 系统抗干扰需求

系统的变频电动机控制部分的整流侧一般为电

容滤波的二极管不控整流或晶闸管整流桥，对电网侧造成一定的谐波污染，所产生的谐波干扰信号通过配电变压器进入其他低压配电网，连接在配电母线上的电气设备受到谐波的危害，轻则降低设备寿命或引起控制设备误动作，重则烧毁电气设备。因此，需要考虑最大限度消除变频器产生的谐波干扰。

变频钻机电控系统的方案设计

基于以上需求分析，应在变频钻机电控系统的转场便捷性、环境适应性、系统集成化、电动机智能控制和抗谐波干扰等功能方面进行开发和设计。

1. 户外预制舱式设计

把系统高低压配电设备、干式电力变压器、电动机智能控制系统（包括变频器柜、PLC 控制柜）和静止无功发生器（SVG）等一次主要设备，以及安防、消防、视频监控、应急灯设施、微正压空调、风机和照明等辅助环控设备，集成在一台绿色环保、便于移动、防腐防潮、防尘防雨、隔热隔音、耐火防撞。且外形美观的非金属预制舱式舱体内，平面布置如图2所示。舱内设置有检修维护走廊和完善的环控设备，使整个系统具有安装便捷、维护方便、抵御户外恶劣环境效果好的性能优势，满足了系统设备户外运行的要求。系统舱内实景如图3所示。

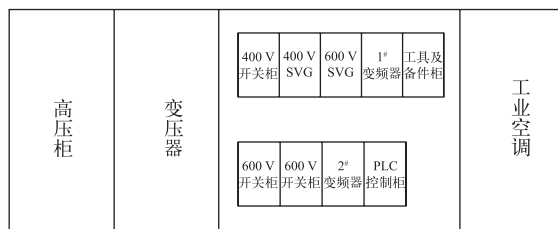


图2 预制舱式变频节能钻机电控系统平面布置图



图3 系统舱内实景

(1) 预制舱体非金属设计

目前石油开采行业中普遍存在的将钻机电控系统置于普通金属钢结构箱房内的产品,虽然具备构造简单、标准化和装配水平高、质量轻、强度高、对电磁的屏蔽性好等特点,但是因为金属材料本身固有特性中存在的弱点,使得金属钢结构的箱房无法满足系统设备户外运行的条件要求。如果以非金属的玄武岩纤维复合预制件作为预制舱体的围护结构,那么由于该预制件聚集了玄武岩纤维、高分子材料和金属钢材的性能优势,使得预制舱体具有抗冲击能力强(抗冲击能量 $>20\text{ J}$)、防腐能力强(60年不生锈)、防辐射性强(辐射指数低于国家标准)、隔热性能好[传热系数 $<2.0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{k})$]、抗冻性能好(耐冻融次数 >15 次)、隔音性能好(不低于建筑构件空气声隔声性能5级)、燃烧性能好(达到不燃A(A1)级)、耐火性能好(耐火3 h以上)和耐候性能好等良好的物理性能,有效弥补了金属箱房易腐蚀、低温脆断、防水性能差、导热系数大、防火性能较差的缺陷和不足,满足了系统设备户外运行的条件要求。

(2) 舱内智能环控系统设计

舱内智能环境控制系统由温湿度传感器、工业空调器、加热器和通风散热风道组成。

1) 温湿度控制设备配置。舱内变频器和SVG等元件设备运行发热、外部环境温度通过预制舱围护结构的渗入热、太阳辐射热为主要热源,根据工程热力学原理,计算出舱内总热量,并据此配备工业空调制冷功率及数量。为了保证极端低温下空调启动和温度保持,舱内配置一定功率的强制风冷加热器。工业空调和加热器的启停受舱内温湿度传感器自动控制,亦可实现自动与手动切换。为了舱体防凝露,需配置一定数量的除湿机,除湿机根据预制舱空间大小及现场环境配置,一般按照舱内相对湿度为60%~80%时,每 50 m^2 配置1台除湿机。

2) 舱内通风散热设计。舱内采用环形风道内循环恒温设计,将热风通道和冷风通道均设置在顶层,空调冷风由舱顶经冷风管引至机柜底部,再由进风口吸入,对柜内各发热元件进行冷却,形成的热风通过机柜顶部热风通道回收到空调回风口(空调回风风机强抽),通过空调内循环处理将热风变为冷风,形成从前到后、由上而下再至上的环形冷却路由,从而在舱内建立了一个封闭的循环冷却系统,配合工业空调使舱内环境温度控制在 $18\sim 28^\circ\text{C}$ 之间,有效解决了系统通风与散热问题。舱内冷热风流动循环示意如图4所示。

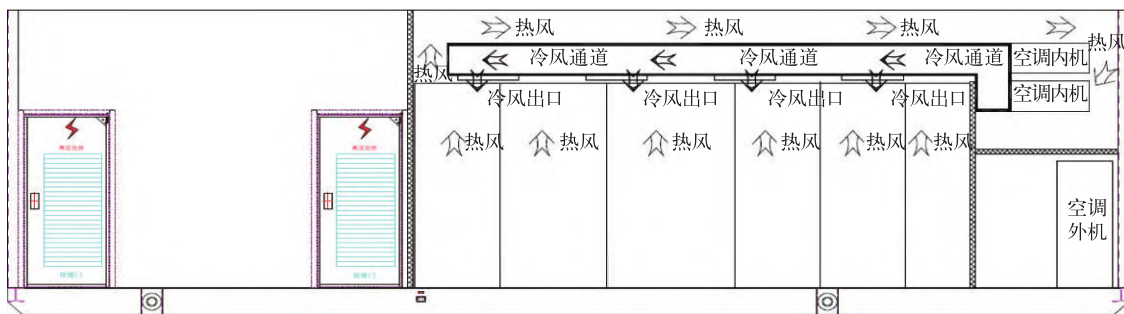


图4 舱内冷热风流动循环示意图

2. 电动机智能控制系统设计

电动机智能控制系统采用基于西门子可编程控制器(PLC)的高性能大功率工程传动变频器调速系统,由PLC控制柜和调速柜两部分组成。PLC控制柜包含变频器控制器、PLC控制器、工控机、交换机、通信模块以及传感器等,用于提供电动机起停、调速控制的人机界面,监测和控制电动机及变频器工作状态。调速柜包含工程传动变频器、相序检测器等。

PLC采用可靠性高的西门子S7-1200 PLC模块,不仅具备小型化、高运算速度、高性能的优势,而且西门子结构化的编程方式开放性好,可支持多种通信协议,适用多种人机界面和监控组态软件,有利于多厂家设备的通信与集成,扩展功能和连接能力与其他产品相比有明显的优势。PLC控制柜与调速柜之间采用光纤通信进行信号连接和电气隔离,自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测,具有测量数字化、控制网络化、状态可

视化、功能一体化和信息互动化特征。同时, PLC通过工业以太网交换机使用光纤连接到司钻房触摸控制屏,在触摸屏即可实现对变频器本体电压、频率等参数的监控和输出模式的动态控制。电动机智能控制系统网络拓扑图如图5所示。

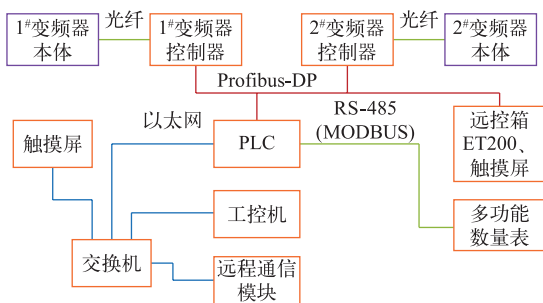


图5 电动机智能控制系统网络拓扑图

调速柜中安装的工程传动变频器,通过改变电动机供电电源频率和电压来调节电动机转速、转矩等运行状态,从而实现变频绞车的电动机变压、变频调速,电动机的正反转、加减速以及快速制动等功能。因此,工程传动变频器是电动机智能控制系统中的核心部件,需要选择一款优质可靠的变频器设备。目前常用的变频器型号为ABB公司的ACS880系列和西门子公司的S120系列多传动矢量变频器,但是价格昂贵,调试周期长,维修周期长。随着国产变频器技术的不断改进,英威腾及禾望等国产品牌的变频器也在部分钻机中得到了应用。本系统选用英威腾GD800工程传动变频器,采用两个500 kW变频器模块组柜,由同一个变频器控制单元进行控制。该模块可以实现四象限运行,即给定正转速,电动机正向旋转,起钻;给定负转速,电动机反向旋转,下钻;给定速度为零,电动机悬停。能实现75~1 650 kW的功率覆盖范围,满足更多能量回馈的场合。模块采用矢量控制方式,变频调速节能技术快速响应指令(闭环矢量 $<0.1\text{ ms}$,开环矢量 $<20\text{ ms}$)。模块具有良好的过载能力,可以达到150%额定电流过载时间60 s,180%额定电流过载时间10 s,200%额定电流过载时间1 s的短时过载能力,满足电动机复杂多变工况下的运行要求。

电动机智能控制系统具有远程监测和历史数据保存功能,应用4G/5G无线通信技术,既能通过手机App或计算机网页查看系统实时信息以及历史记

录数据,又能在本地查看全部数据;根据电动机的转速、转矩等实时运行参数动态调整输出电压、电流和频率,动态适应各种复杂工况,防止钻机因异常负载或突变负载造成的过电流、过载损坏;实时监测和上报电动机温度、变频器温度、风压信号、运行状态和电源电流电压等参数,确保工作人员能够及时掌握现场运行状态。

3. 抗谐波干扰设计

变频器所产生的谐波干扰信号对接入同一配电网的其他电子、电气设备产生影响,为了最大限度消除变频器谐波干扰,系统采用静止无功发生器(SVG)替代常规的电容补偿装置滤除低次谐波。SVG是以IGBT为核心的无功补偿系统,具有滤除低次谐波的功能,快速连续地提供容性和感性无功功率,实现输出容量从感性无功至容性无功的连续自动调节。装置响应时间短,运行效率高,过载能力强,保障电力系统稳定、高效和优质的运行,且SVG成套装置具有免维护功能和人性化操作界面,操作灵活简便,可靠性高。同时配置谐波保护器滤除高次谐波,使电压谐波畸变率THDu不超过3%,有效改善母线电能质量。

4. 快速配送式设计

按照户外预制舱标准化设计、工厂化加工和配送式运输的理念,依托产品通过统一标准、统一方案和统一模块的标准化设计,通过统一设备、统一工艺和统一作业的工厂化流水线加工,即可以在工厂内完成舱体内部电力设备生产制作、进舱组装、一二次配线和联调联试等工作,同时将舱体外形宽度设计为3 m,与运输车板宽度一致,实现舱体整体快速配送式运输。运输至钻井施工现场后,通过机械化现场作业,完成吊装、组合、就位等一系列操作。系统标准化设计、工厂化加工和配送式运输,不仅保证了系统质量品质满足设计要求,而且减少了现场“湿作业”和劳动力投入,实现了环保施工,提高了施工效率。具体如图6、图7所示。



图6 舱体快速配送式运输



图7 舱体吊装图

电控系统技术生命周期及成熟度分析

技术生命周期是指技术产生到消亡的全过程，可分为萌芽期、成长期、成熟期和衰亡期四个阶段。在技术成长过程中受到知识、工具、空间、应用环境和新技术等因素的制约，在技术方案设计、技术开发、初步设计、关键技术设计、生产与部署、使用与保障等环节，不同时期呈现不同的技术成长特征，技术成长过程表现为“S”形技术指数增长模型，如图8所示。

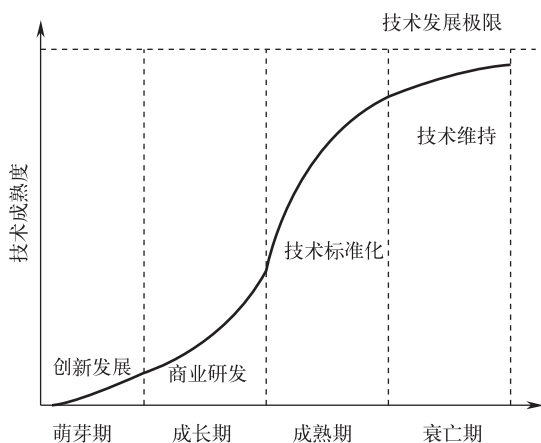


图8 技术生命周期示意图

技术成熟度是一种评价某领域关键技术完善程度的指标。通过充分利用技术生命周期、研发内容和技术成熟度之间的直接对应关系（见表1），分析出技术现状与预测技术发展趋势，为企业技术研究和投资决策提供重要依据。

表1 技术生命周期-研发内容-技术成熟度对应表

技术生命周期	萌芽期	成长期	成熟期	衰亡期
技术研发内容	技术理论研究 技术应用研究 前期技术开发 用户需求分析	可行性论证 解决方案分析 物料研发决策 技术商业研发	初步改进设计 关键改进设计 标准化设计 生产与部署	使用和保障 新技术研发
技术成熟度	创新发明	商业研发	技术标准化	技术维持

结合技术生命周期、研发内容、技术成熟度对应情况表和技术生命周期示意图，得出基于网电的预制舱式智能大功率变频钻机电控系统技术生命周期正处于成长期向成熟期过渡的阶段，技术成熟度

正从商业研发向技术标准化阶段迈进。

结束语

2019年11月，该套预制舱式变频节能钻机电控系统在甘肃酒泉某井队第一次投入实际应用，根据实际使用情况反馈，效果很好。因此，在石油开采“油改电”“电代油”的趋势背景下，通过对基于网电的预制舱式智能大功率变频钻机电控系统研究得出以下结论。

1) 系统具有转场便捷性好、环境适应性强、系统集成化高、电动机智能控制高和抗干扰能力强等特点，极大满足了石油钻井作业现场变频节能钻机电控系统对三相交流变频调速异步电动机的运行控制需求。

2) 系统技术遵循“S”形技术指数增长模型，正处于成长期向成熟期过渡的阶段，基础理论和生产工艺已趋于成熟，是石油钻井机控制系统技术发展的趋势所在，随着系统产品量产后形成的高商业回报率，将助推该系统技术的进一步发展。EA

（收稿日期：2023-02-24）

参考文献

- [1] 安建钧，安建珍. 钻机变频传动电控系统的总体设计[J]. 电气传动自动化，2006(6): 39-45.
- [2] 陈国海. 钻机PLC控制系统的设计与应用[J]. 广东科技，2015(24): 61-62, 67.
- [3] 罗佩豪，李云鹏，王波，等. 新型海洋模块化钻机钻井电控系统的技术分析[J]. 中国科技信息，2016(4): 163-165.
- [4] 于雪梅，刘坤. 西门子变频器在石油钻机中的应用[J]. 机械工程师，2015(8): 235-236.
- [5] 商保刚，王旭，王吉建，等. 变频钻机电气控制系统发展研究[J]. 中国石油和化工标准与质量，2019(22): 153-154.
- [6] 林康军，朱桥飞，刘情. 基于现场总线的全数字化交流变频钻机电控系统探讨[J]. 电气应用，2011, 30(23): 70-72, 77.
- [7] 张嘉嘉，李雅婧，黄旭. 石油化工电气系统电阻接地设计探讨[J]. 电气应用，2021, 40(9): 79-82.