

[石油装备]

海洋模块钻机变频器国产化研究及应用

文/中海石油（中国）有限公司深圳分公司 黄泽彬

海洋石油钻井平台电控系统核心部件大功率多传动变频器国产化的建设及应用对中国海洋石油工业的健康发展具有重要意义。概述了海洋装备变频器的发展现状，分析了国产海洋钻机变频器的主要技术突破及创新，介绍了国产海洋钻机变频器首次在南海区域惠州油田HZ32-5DPP平台上的应用。

变频器在海洋钻机中应用现状

钻机三大系统（循环系统、起升系统和旋转系统）不同时工作的实际工况，海洋平台狭小的空间，绞车、泥浆泵同步驱动的特性，使得多传动变频器更加适用海洋钻机电控系统。我国在1998年首次将变频钻机技术引入，其优秀的控制性能及较高的自动化程度，迅速得到了国内石油行业的认可。目前全变频电动钻机已占据国内钻机订单的大部分份额。其主要应用的产品为西门子的6SE70（已停产）及S120，ABB的ACS800（已停产）及ACS880。

经过多年的发展，我国石油装备制造企业进行技术的学习、吸收及创新，目前已有了完整的国产全数字变频钻机机械设备的制造能力，并处于世界领先地位。我国海洋石油新建平台的钻机已全部采用全数字变频电动钻机方案，机械核心设备也已实现了国产化。但电控核心部件——大功率多传动变频器仍采用欧洲进口品牌的产品，欧洲大功率多传动变频器厂商基本上独揽国内石油钻机电驱动系统的市场。以变频器为主要部件的电驱动控制系统的核心技术仍然掌握在国外企业。如何实现钻机电驱动控制系统的国产化替代，并打破进口品牌核心部件变频器产品在油气装备领域应用的垄断地位，是解决海洋油气勘探

开发装备国产化的关键一环。因此，研究开发具有国际先进水平的以大功率多传动变频器为核心的海洋石油钻机电驱动控制系统，对提高我国海洋石油钻井装备制造业的核心竞争力，摆脱国外技术制约，提升我国科技水平及创新能力，保证国家经济安全等方面，都具有重要的意义。

国产海洋钻机变频器主要技术创新

首次应用于海洋钻机的变频器为深圳市汇川技术股份有限公司自主研发的HE300系列大功率多传动变频器。其在多传动技术、功率密度、设备模块化、同步控制和易用性等方面有了较大的突破及创新。

国产变频器HE300通过独特的结构设计、叠层母排和热设计，使得产品的功率密度相比国际主流品牌具有竞争优势。1 200 kW逆变柜宽度只有600 mm，相比ABB和西门子的产品小200 mm。

国产变频器HE300采用最新一代的HPM级大功率单管IGBT器件，器件采用单管封装，ALSIC基板，低分布电感的设计，结温175℃，实现额定电流3 600 A，达到在相同功率下使用器件更少、综合体积更小且可靠性更高的效果。

HE300产品设计采用薄膜电容，其使用寿命更长。薄膜电容寿命可达10万h（对比电解电容，寿

命为5万h)；工作温度范围更宽，薄膜电容工作温度 $-40\sim+85^{\circ}\text{C}$ （对比电解电容，工作温度 $-25\sim+85^{\circ}\text{C}$ ）；电气结构更简洁，薄膜电容无须串联，无均压器件（对比电解电容，需要通过串联、增加均压电阻满足 $\geq 400\ \Omega$ 的应用要求）；最高耐受电压更高，薄膜电容最高耐受1.5倍短时过电压（对比电解电容，一般耐受1.1倍过电压）。

国产变频器HE300在柜体结构设计与防腐材料研究双重保障。不同于集中式散热，采用创新的分布式设计和精确的仿真，使得散热更均匀，风阻系数更低，增大系统的散热能力，提高模块的热承受能力，同时提高结构的抗振性。风道与内部元件采用隔离式设计，隔绝粉尘，减少盐雾影响；分布式的设计提升了产品在负载突变、瞬时热冲击大等特种工况下的适应能力，更加适用于绞车起下钻时的冲击性负载。逆变柜立风道如图1所示。

通过对多电动机主从控制技术的研究，提高多电动机协调控制的能力；通过并联均流技术研究，搭建并机均流仿真模型，优化算法设计，使各并

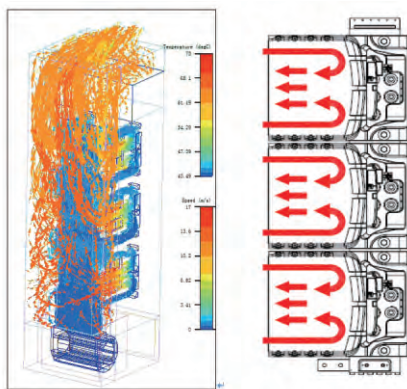


图1 逆变柜独立风道示意

联逆变器达到均流指标；通过复矢量电流控制技术，建立异步电动机的复数数学模型，设计基于复矢量的纯数字控制算法，改善MT轴之间的耦合。多电动机主从控制系统主要以系统观念入手，宏观上分析多电动机控制方法，另外，还需要从微观的角度引入抗扭振等抗扰控制，以使多电动机系统有效协同工作。主从控制系统框图如图2所示。

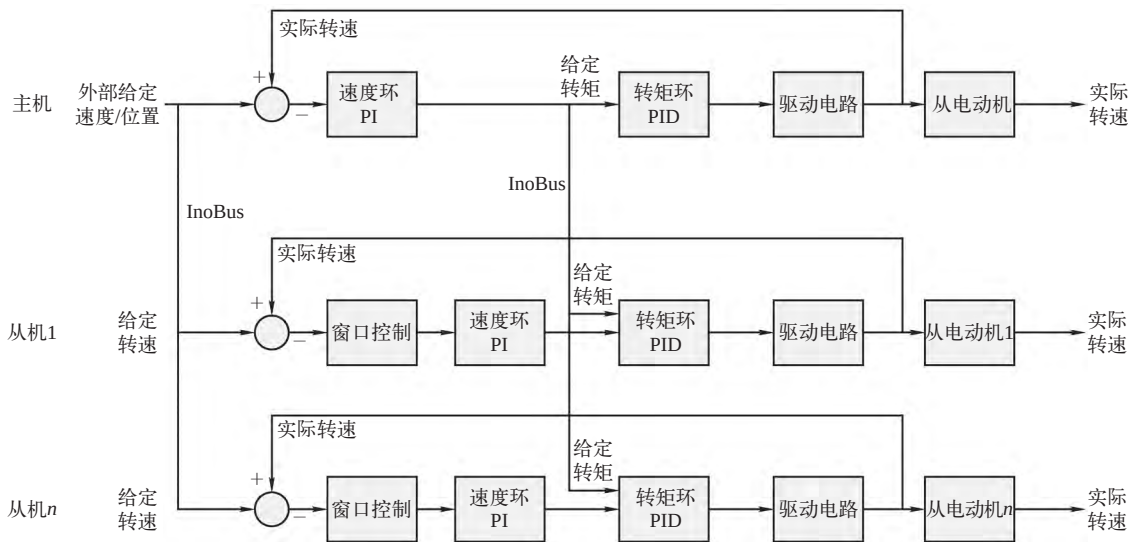


图2 多机主从控制框图

主机和从机之间采用内部光纤通信交换数据，这样数据传输速度快，使从机实时跟随主机，确保绞车及泥浆泵的同步性能。

为了便于调试及监控，HE300大功率多机传动变频器还开发标准PC调试软件。软件全中文友好界面，使用便捷，无须任何系统专业知识。调试工程师通过图形化界面菜单式操作，即可短时间内完成复杂系统的简便组态、参数设置、故障检测，系统维护和服务。调试界面如图3所示。

调试软件还具备连续显示多个波形功能，可



图3 调试界面

根据需要同时监控记录最多8个信号的波形，简化了变频器的诊断及优化。同时，可调取控制器内部黑匣子记录仪，故障前后50个被观测对象信息

可被完整还原，可帮助现场电气维护人员高效定位故障，以及优化PLC的过程控制工艺。监控界面如图4所示。

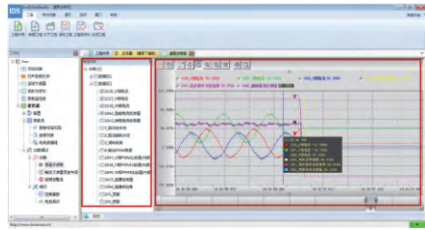


图4 监控界面

国产化海洋钻机驱动系统配置及应用

本文以首次国产变频器在海洋钻机应用的项目，南海惠州油田HZ32-5DPP平台示范项目为例介绍国产化海洋钻机变频器的配置及应用。钻机型式为70/4500，具体型式配置如表1所示，驱动电动机配置如表2所示。

表1 石油钻机基本型式和基本参数

钻机级别		70/4500
名义钻井范围/m	127 mm钻杆	4 000~6 000
	114 mm钻杆	4 500~7 000
最大钩载/kN		4 500
绞车功率	kW	1 492~2 240
	hp	2 000~3 000
游动系统绳数	钻井绳数	10
	最多绳数	12
钻井钢丝绳直径	mm	35,38
	in	1 3/8, 1 1/2
泥浆泵单台功率不小于	kW	1193
	hp	1600
转盘开口直径	mm	698.5, 952.5
	in	27 1/2, 37 1/2

表2 HZ32-5平台钻机交流变频电机配置及参数表

用 途	绞车电动机	泥浆泵电动机	顶驱电动机	送钻电动机
额定功率/kW	800	600	900	45
额定电压/V	600	600	600	480
额定电流/A	915	714	714	60
额定转速/(r/min)	740	661	661	1 500
最高转速/(r/min)	1 253	1 060	1 060	2 950
额定频率/Hz	37.5	33.5	33.5	50
额定转矩/(N·m)	10 324	8 684	8 684	286
极数	6	6	6	4
数量	2	6	1	1
保护等级	IP54	IP54	IP54	IP54

变频系统共由5组整流器及8组逆变器组成，两台绞车电动机之间需要同步控制进行钻井作业中的起下钻及下套管工作，泥浆泵共6台电动机，每2台共同驱动一台1 600 Hp泥浆泵，进行钻井液的循环。变频系统与PLC上位控制系统通过DP通信进行信息交互。如图5所示。

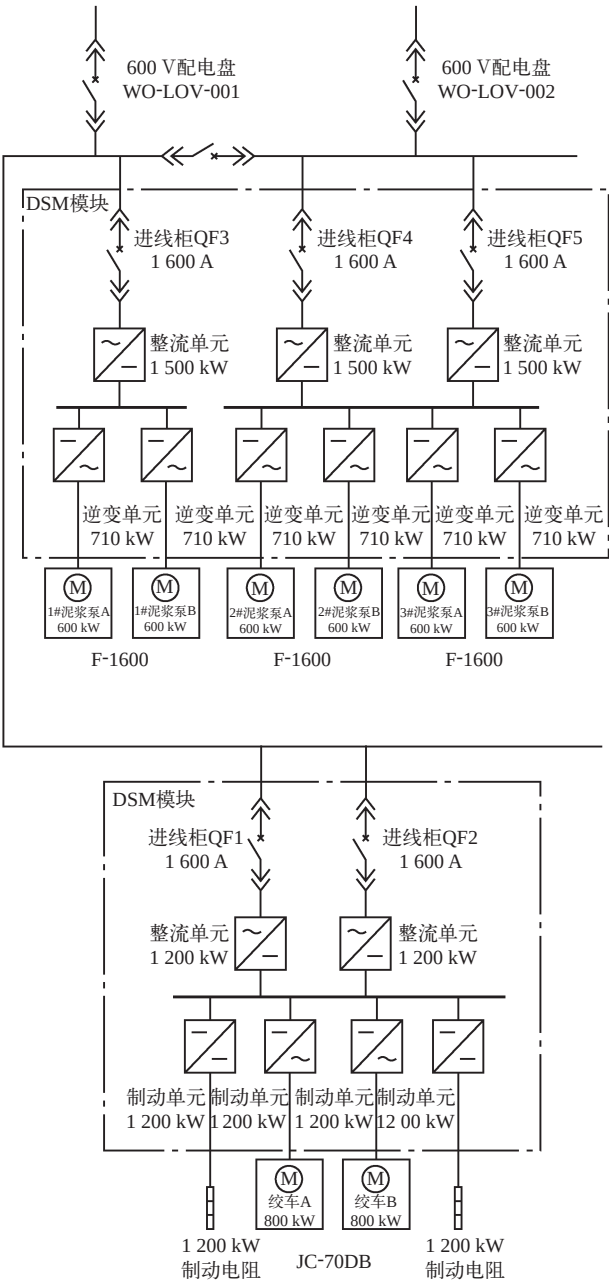


图5 HZ32-5DPP钻机变频系统选型及单线图

钻机绞车、泥浆泵对控制系统的同步（负荷分配）要求较高，同步控制及其性能是衡量驱动设备能否满足钻机应用重要的指标。HZ32-5平台海洋钻机使用的国产化变频器绞车同步采用主机

PI+从机P控制的控制方式，主、从机都工作于速度控制模式，接受相同的速度设定。主机的速度调节器采用PI控制器，从机的速度调节器采用P控制模块，同时将主机速度调节器的积分分量叠加到从机的速度调节器输出，从而完成了转矩在稳

态过程中的分配。由于从机既接受主机的给定，又拥有自己的速度调节器，在应用于刚性连接设备时可获得与主机速度控制+从机转矩控制相近的控制性能；而在硬连接断开时也可以保证从机速度受控。控制框图如图6所示。

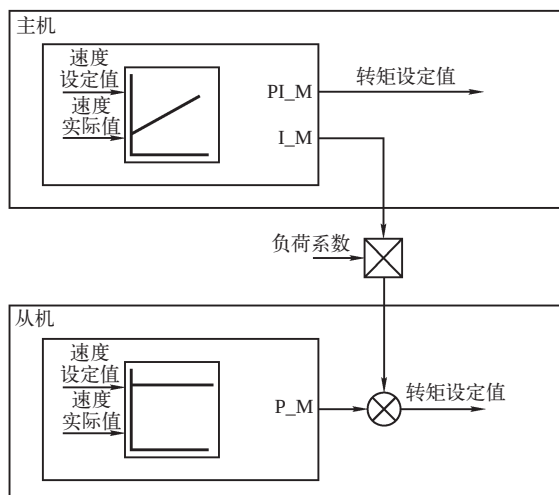


图6 主机PI+从机P控制框图

HZ32-5项目国产变频器实际运行曲线如图7所示。

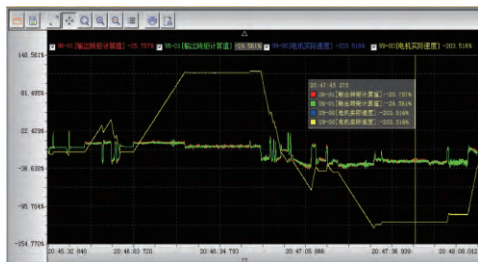


图7 绞车双电动机运行曲线（速度、转矩）

泥浆泵电动机的同步控制采用软化（下垂）控制，其原理是利用电动机的输出转矩进行负反馈，以降低电动机给定转速的控制方法。控制准确度略低，但稳定性好，应用简单，在多个电动机共同拖动一个负载时，由于机械特性的不同，即使给定相同的转速，各电动机间仍然存在微小的偏差，同时会导致输出转矩有较大差别，甚至出现电动机间相互拖拽的情况。在电动机上应用软化（下垂）控制，可以实现电动机间的负荷自动均分，并且不需要在电动机间进行通信。实际速度较高的电动机会承担更多的转矩，通过负反馈会自动降低自身的速度给定，实现转矩向其他电动机分配的目的。其控制简单，且在双电动机需要实现冗余运行时，可以方便地停掉故障设备而保持其他设备正常运行。保证控制性能的同

时也提高了整个驱动方案的可靠性及冗余度。

HZ32-5项目国产变频器实际运行曲线如图8所示。

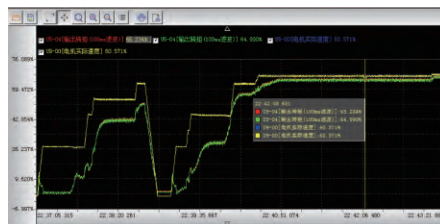


图8 泥浆泵同步运行曲线（速度、转矩）

结束语

HZ32-5平台钻机使用国产海洋钻机变频器HE300，自2018年10月正式投运以来，截止到2019年12月，已零故障运行14个月，并已完成了12口井的钻井作业（其中有3口大位移井）。国产大功率多传动变频器在运行过程中经受住了多种复杂的工况及严酷环境的考验。其功能、性能、易用性和可靠性等方面均能满足7 000 m海洋模块钻机的应用要求。国产大功率多传动海洋钻机变频器在HZ32-5项目的成功应用经验将对我国海洋石油工业具有深远的影响，本课题所研究及应用的国产化海工变频器可在海洋模块钻机、船舶和港口进行推广，进一步扩大国产核心技术及产品的应用。EA

（收稿日期：2020.03.12）

（编辑：朱金凤）