

。 专题研究 。

文章编号: 1001-3482(2008)03-0001-05

破除旧观念 创造新钻机(一)

陈如恒

(中国石油大学(北京), 北京 102249)

摘要: 由于世界石油资源紧张, 油气勘探开发掀起高潮, 带动钻井装备迅速发展。以交流变频电动钻机为龙头, 以科技创新为核心, 不断扩展电动钻机的优越性能, 为自动化、智能化钻机构筑平台; 以高可靠性、安全性和先进性创造国际名牌钻机, 满足国内钻井新技术的要求, 提高钻机的国际市场竞争能力。通过现场调查和查阅文献, 深感观念与知识落后于形势发展, 提出一些有关钻机的变革和创新课题, 供同行研讨。

关键词: 交流变频电动钻机; 顶部驱动钻井装置; 智能化钻机; 生态文明

中图分类号: TE92 **文献标识码:** A

Breaking-up Old Concept, Creating New Drilling Rigs (Part1)

CHEN Ru-heng

(China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: Due to the shortage of petroleum resource all the world, the oil and gas exploration and exploit are rising greatly. As frequency-conversion electricity driven rig being in leading position, technical creation being the core, the superior performance of motor driven rig has been continuously developed for the automatic and intelligent drilling platform to build high reliable, safe and advanced domestic drilling rig with international brand to meet domestic requirement of new technology, meanwhile, to compete in the world market. Based on the information from practical survey and reference, it is deeply felt that existing concept and knowledge are behind the development requirement, thus some proposals of rig transform and new creation task are made in this paper for discussion.

Key words: AC frequency conversion electricity rig; top drive drilling units; intelligent rig; zoology civilization

近年来, 由于世界石油资源紧张, 激起油气钻探热潮, 带动钻井装备迅速发展。但我国钻井装备技术却发展缓慢, 究其原因是从业者主观的守旧观念, 客观上是使用方缺乏电气人员, 对电动钻机缺乏认识, 只着眼于钻井低成本战略, 乐于购置一次性投资少的机械钻机和复合钻机, 制造者按订单只生产少量电动钻机, 主要供出口境外钻井承包服务; 创新资金投入不足, 致使一度领先的技术优势落后于国际

发展速度。扭转劣势的关键在于技术创新, 本文拟分16个小专题介绍新技术和一些创新课题, 供同行研讨, 以期赶上国外钻机发展势头, 提高国产钻机在国际市场的竞争力。

1 立足创新 着眼国际竞争力

当今, 经济全球化, 科技发展日新月异, 以高新技术为核心的技术与装备日益成为国际竞争的焦

收稿日期: 2007-08-13

作者简介: 陈如恒(1927-), 男, 河北秦皇岛人, 教授, 博士生导师, 本刊顾问, 主要从事石油矿场机械、机械设计与自动化的教学与科研工作。

点。自2006年以来,国际原油价格不断飚升,由\$70元/桶上升到2007-10的\$90元/桶,激起了前所未有的油气勘探开发热潮,推动钻井技术日益出新,钻井装备的设计、制造技术也日益进步,市场日益旺盛^[1]。

在世界范围内,陆地5 000 m以内的井已经钻完80%,纷纷向超深井找油,海洋钻探也向深水域发展(1 500~3 000 m水深),这都要求研制、提供10 000~15 000 m井深的超大型钻机。美国2006年大于4 572 m井深的钻机共动用210台,最深完钻10 420.8 m^[1]。国民油井瓦科公司研制出系列交流变频电动钻机,钻机设计规范,成熟度和可靠度高,其绞车额定功率最大达5 292 kW(7 200 hp),绞车能耗制动转矩大,能悬停最大钻柱载荷,可充任主刹车,TDS-1000型顶部驱动钻井系统提升能力907 t(1 000 st),额定功率1 102.5 kW(1 500 hp),处于世界领先水平。

我国已进入创新型国家行列,走中国特色的创新道路,载人航天工程、微电子技术、信息工程、生物工程(水稻优种)、机器人应用、新能源开发等取得了举世瞩目的成果。在石油钻井技术方面,正向着提高勘探成功率和油气采收率,降低钻井成本方向发展,“能打丛式井不打单井,能打水平井不钻直井”看似绝对化,却道出了发展大趋势。目前,全国的大位移井、水平井占总井数的1/5,仅中石油2006年就钻水平井600口。钻井技术的进展体现在以下诸多方面。

a) 复杂井、超深钻井 7 000~10 000 m井深,硬岩漏塌,高温高压,高陡构造防斜钻直井,大型钻机,复合高强度钻具。

b) 大位移井、水平井 位移在6 000~8 000 m,旋转导向MWD、LWD闭环钻井,井底动力钻具钻井。

c) 碳酸盐岩层钻井 以欠平衡钻井为主,空气钻井,旋转BOP。

d) 低压、低渗、薄层油藏钻井 丛式井、斜井、开窗侧钻、水平井、超短半径水平井、多分支井、小井眼钻井、欠平衡钻井等。

e) 钻天然气井 高压大产量天然气井、反循环天然气钻井、煤层气钻井等。

f) 其他超前钻井新工艺技术 套管钻井、连续管(CT)钻井修井、不间断循环钻井、超高压射流与钻头联合钻井、气液旋冲钻井等。

上述以水平井和欠平衡井完井数最多。

在发展钻井新技术的同时,我国“十五”期间钻井装备更新改造工程取得长足进展,除改造了大批老钻机以外,还新制造了大批复合驱动钻机和电动钻机,生产了1 000~9 000 m系列钻机约800套。为了国内超深井钻探的需要,研制了12 000 m超大型钻机,已生产20套超低温极地钻机出口俄罗斯,生产了直升飞机搬运的钻机出口菲律宾,在新几内亚丛林中钻井。全国6大钻机制造企业共有年产300套钻机的规模,我国已成为仅次于美国的世界第2大钻机生产国。

我国石油钻采装备以其性能良好、价格便宜而在国际市场上占有一席之地,其中,钻井泵、抽油机早在20世纪80年代初已出口加拿大等国,80年代末到90年代,电动钻机和车装钻机向多国出口。21世纪以来,交流变频电动钻机、顶部驱动钻井装置和井控装置也成批向多国包括美国出口。以国产钻机组队境外承包钻井工程达180项,可以说,我国石油钻采装备已初具国际竞争的实质,跨国经营、境外投资建设油田、建制造厂也取得可喜进展。但应清醒地看到,美国的钻井装备无论从数量上、质量上都处于世界领先和垄断地位,德国和法国的钻机尤其是变频器交流调速系统都是无与伦比的。我国在用钻机约1 800台,大、中、轻型各占35%,50%,15%,其中电动钻机仅180台,只占10%,且大部分在境外作业。国产装备中部分核心器件仍依赖引进,这就制约了国产钻机的技术进步,自主知识产权较少,在国际市场上单靠价格优势终究处于被动吃亏的地位。现今正处于国际钻机制造业蓬勃发展的黄金时期,我们应该抓住难得的机遇,奋起迎接挑战。

首先,要广集信息,从加强国际交流合作、技术与样机引入入手,经过消化吸收再创造,以缩短新产品研发周期;其次,要满足国内外钻井新技术提出的要求,适应不同国家地区的特点,包括海洋、沙漠、极地、山地和丛林等地域;最后,按照国际标准要求设计制造钻机,并千方百计降低成本,扩大电动钻机的国内市场,打造国际名牌钻机,畅销国际市场,力争领先地位。

2 21世纪是交流变频电动钻机的世纪

20世纪60年代至80年代是机械驱动钻机成熟并发展的时期,但无论是柴油机驱动或交流电动机驱动,都必须配备有限挡的齿链变速机构。1926年DC-DC直流电传动开始用于多种工业领域,如电车、轮船、造纸业等,它可连续无级调速,一直引领机

械调速领域半个多世纪; 1955 年这种传动开始用于海洋钻机上; 1967 年, AC-SCR-DC 直流电动钻机(SCR-可控硅整流器)开始用于海洋钻机上; 1976 年, 它逐渐用于陆地钻机上, 性能也日趋完善, 并逐步取代部分机械钻机, 这种钻机已称雄 30 a, 仍有相当的市场需求。美国通用电气公司从 1955 年开始生产 GE752 型直流电动机配备于钻机上, 如 GE752AF8 型他励直流电动机(800 kW), 性能优良, 已成批供应市场。

AC-VFD-AC 驱动交流变频电动钻机面世比较晚, 约在 20 世纪 80 年代末期。90 年代初, 由于早期的逆变器是用 GTO 可关断晶闸管构成的, 这种大功率开关元器件的开关频率低, 开关损耗高, 转矩动态响应慢, 可靠性不高, 初期尚无能耗制动; 其次, 整流过程由开关斩波形成梯形波, 不可避免产生高次谐波, 引起电网电压波形严重畸变, 对电动机产生附加的功率损耗、发热及共振, 对继电器保护回路及电控系统产生干扰和误动作, 所以 GTO 交流变频电动钻机发展迟缓。直到 90 年代中期, 改用 IGBT 绝缘栅双极型晶体管构成逆变器, 其功能才渐趋完善。至 21 世纪初, 多电平逆变器交流变频电动钻机及其能耗制动系统发展成熟, 能与直流电动钻机的性能相抗衡并取而代之。GE 公司生产的钻井专用交流变频电动机, 如 GEBAC 型变频异步电动机(850 kW)其恒功率调速范围达 2.8, 它的尺寸和 GE752 直流电动机的完全相同, 可以互换。至今, 海洋平台上的直流电动钻机已基本改装成 VFD 驱动的。

超深井钻机要求其绞车和转盘的转矩超载倍数大, 能处理恶性钻井事故, 由于起下钻次数特别多, 为了提高起钻时效, 要求绞车功率大, 恒功率调速范围宽, 钻机可靠性高, 安全性高, 这些要求机械钻机是不能胜任的, 直流电动钻机也有其局限性, 所以, 历史发展的必然是性能更优越, 可靠性、安全性更高的交流变频电动钻机必将在 21 世纪大行其道, 日臻发展和完善。

我国 50 多 a 以来一直以机械钻机为主, 1986 年兰州石油化工机器总厂(简称兰石厂)生产了第 1 台 SCR 驱动的 ZJ60D 型钻机, 1996 年兰石厂生产了第 1 台 VFD 驱动的 ZJ40DB 型钻机, 都由于性能不完善而停用。1997—2005 年, 兰石厂和宝鸡石油机械厂(简称宝石厂)生产了多台 ZJ50DZ, ZJ70DZ 型直流电动钻机, 2000 年, 四川宏华石油设备有限公司(简称宏华公司)生产了 ZJ40DBS、ZJ50DBS、

ZJ70DBS 型交流变频电动钻机, 并成功配备了绞车能耗制动系统。2007 年, 宝石厂研制成功 9 000 m 交流变频电动钻机, 配套北京石油机械厂制造的顶驱, 迎头赶上国际钻机发展的主流。但我国交流变频电动钻机生产数量还很少, 主要供出口, 配套还不够完善, 钻机的性能还有很大扩展空间, 应再接再厉不断改进和创新, 谱写 21 世纪交流变频电动钻机大发展的新篇章。

3 直流电动钻机比不上交流变频电动钻机^[2-3]

国内在用电动钻机数量很少(约占总台数的 2%), 究其原因, 首先推广电动钻机的最大障碍是缺乏电气技术人员; 其次是造价高, 这有待制造厂和高等院校联手加强培训从业者, 同时努力降低造价; 最后, 就是从从业者观念保守, 对新生事物缺乏认识, 通过考察和实践会克服原有思想障碍。

3.1 2 种电动钻机的共同优越性能

a) 可频繁带载启动(不需装摩擦离合器), 可增转矩 1.5~2.0 倍, 处理钻井事故能力强, $n=0$ 时能静悬最大钻柱载荷。

b) 适应钻井作业转矩变化特点, 连续无级调速, 功率利用率高, 时效高。

c) 发电机组交流电整流后在直流母线并网(电流统一驱动), 根据钻井负载变化, 自动摘挂挡, 提高功率利用。

d) 独立驱动、运移性高, 适合钻丛式井和在海洋平台上应用。

e) 可靠性高, 取消了链条或 V 带并车传动, 不用装摩擦离合器等, 故障率 < 2%。

f) 安全性高, 有电控限矩、限压联锁保护功能。

g) 与机械钻机相比, 节能性、经济性高, 传动效率提高 20%~30%, 可用功率提高 20%~25%, 维修费节省 60%(直流)、90%(交流), 节约燃料 10%~15%, 柴油机大修周期延长 20%~25%。

h) 易实现钻机的机械化、自动化和智能化。

3.2 交流变频电动钻机比直流电动钻机好(如表 1)

从上述 2 种电动钻机的共性和个性对比来看, 电动钻机性能绝对优于机械钻机, 而交流变频电动钻机更优于直流电动钻机; 缺点就是造价更贵。而使用者最关心的恰恰是这一点, 但从钻机的服役周期 15 a 来考虑, 总成本包括制造成本和使用成本 2 方面, 电动钻机的使用成本要低很多, 其一次投资在使用中可补偿 50%~70%。这样一算总帐, 就会得

到一个新认识: 贵得值!

表 1 2种电动钻机的性能和优缺点对比

序号	直流电动钻机	交流变频电动钻机
1	直流电动机有换向器和电刷, 产生火花, 在井口使用不安全。	交流电动机无电刷, 不产生火花, 更安全。
2	恒功率调速范围窄, $R=1.2\sim 1.3$, 必须配4~6挡绞车, 2挡转盘。	恒功率调速范围宽, $R=2\sim 3$, 可配双速单轴绞车, 单速转盘。
3	网侧功率因数低, $\cos\varphi=0.5\sim 0.7$, 经滤波及无功补偿装置 $\cos\varphi=0.9$ 。	网侧功率因数高 $\cos\varphi\approx 1$, 经滤波装置 $\cos\varphi=0.97\sim 0.98$ 。
4	无能耗制动, 主刹为盘刹, 辅刹为电磁刹车, 在 $n=0$ 时转矩=0, 不能刹住最大钻柱载荷。	主刹为能耗制动, 在 $n=0$ 时能刹住并悬停最大钻柱载荷, 副刹为盘刹。
5	在轻载时出现电流断续区, 加上动态转矩响应差, 电动机难以实现自动送钻, 只能依靠盘刹自动送钻。	主电机与独立小电机能耗制动联合自动送钻。
6	直流电动机结构复杂, 可靠性差, 故障率较高, $< 2\%$, 造价较高, 维修工作量大。	交流电动机结构简单, 可靠耐用, 造价低, 免维修, 故障率 $< 1\%$ 。
7	直流电动钻机造价约为机械钻机的2倍。	造价比直流电动钻机贵20%(缺点)。
8	电压、电流双闭环控制或转速转矩双闭环控制, 稳速精度低, 动态性能差。	无速度传感器控制, PWM变频传动系统稳速精度高, 动态性能好。要多装数个逆变器, 变频柜发热量大, 要大排量通风冷却。

4 磁场定向矢量控制和直接转矩控制对比^[4]

4.1 交流变频电动钻机调速系统控制原理

4.1.1 磁场定向矢量控制 VC

交流异步电动机的电磁关系具有多变量、非线性、强耦合的特点, 这使其调速控制变得非常困难。1972年 F. Blaschke 提出异步电动机的磁场定向矢量控制方法, 该方法将异步电动机经过坐标变换(电流空间矢量变换)等效成直流电动机来控制, 令转子磁链等于恒值, 对定子磁链和电磁转矩分别采用闭

环控制, 实现磁场和电流的解耦, 开拓了异步电动机的调速理论和控制技术, 这样一来, 异步电动机的调速特性就和他励直流电动机的调速特性相同。

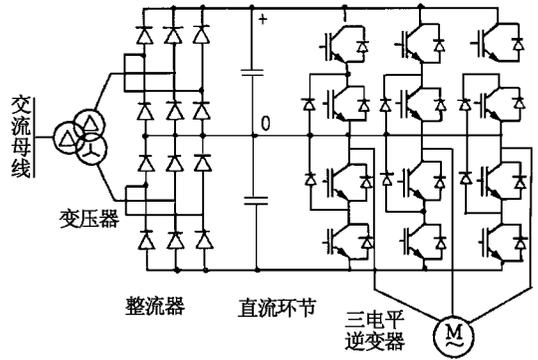


图 1 Siemens 三电平中压电压源型变频器拓扑结构

图 1 给出 Siemens 的典型三电平中压电压源型变频器结构原理, 首先经过隔离变压器、整流器、LC 滤波器和逆变器实现交一直一交的变换; 其次通过逆变器中 IGBT 开关元器件构成的桥路, 实现 PWM 脉宽调制的触发控制模式, 使逆变器输出的电压基波的频率和幅值均可调控, 但开关电路只能输出数值为正或负的矩形波电压, 除基波外还含有频率为 3、5、7 次的高阶谐波, 构成对电网和电气设备的干扰, 必须装设滤波器或多电平逆变器以降低谐波含量, 使输出电压波形接近正弦, 使逆变器更适于钻机的大容量负载特性。

4.1.2 直接转矩控制 DTC(如图 2)

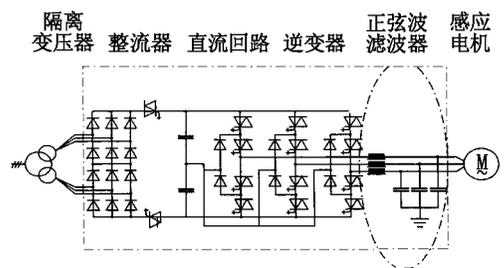


图 2 ABB 带正弦输出滤波器的三电平中压电压源型变频器拓扑结构

20 世纪 80 年代中期, 德国 M. Depenbrock 和日本 I. Takahashi 等人相继提出六边形乃至接近圆形磁链轨迹的异步电动机转矩直接控制方法, 该方法在电动机的模型中, 通过直接在定子坐标上进行动态计算, 得到定子磁链和转矩的大小, 动态计算用高速数字信号处理器(每秒刷新 4 万次)根据连续不断运转的电动机更新数据, 以及实际数值和设定数值之间的比较, 在磁链的圆形轨迹气隙中产生与转

矩同向的定子旋转磁链和电磁转矩,二者联合控制逆变器的 IGCT 开关状态,即直接控制转矩,其触发控制模式与 PWM 方式不同。图 2 中逆变器由 24 支 IGCT 中间嵌位串联成三电平逆变桥路,产生光滑的正弦波电压和可调频率来控制异步电动机的转速,提供最快的转矩响应,如图 3。

DTC 在不使用速度编码器的情况下,无论电源波动或负载突变都能对电动机实现精确的控制。

4.2 2 种控制模式对比(如表 2)

VC 控制比 DTC 控制早应用 10 a,技术相对成熟一些,从表 2 看,二者总的性能相差不多,但从转

矩、速度直接控制和部件、元器件数量及可靠性上看,则 DTC 控制略胜一筹。

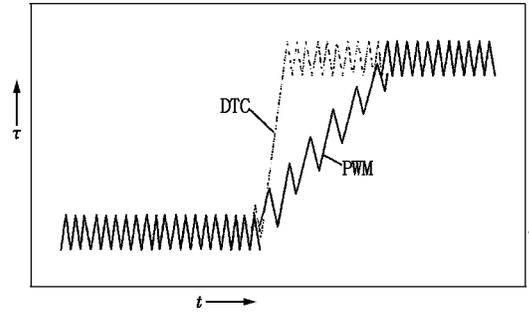
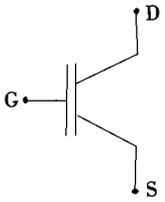
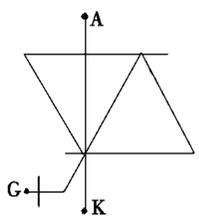


图 3 DTC 与 VC 的 PWM 转矩响应比较

表 2 2 种控制模式对比

特性	矢量控制(VC)	直接转矩控制(DTC)
代表生产厂 典型产品	Siemens 中压电压源型变频器(图 1), 6SE70, 71, 交流变频调速系统	ABB 中压电压源型变频器(图 2), ACS600, ACS1000 交流传动系统
功率开关 元器件		
	IGBT 绝缘栅双极型晶体管	IGCT 集成门极换流型晶闸管
功率电路	紧凑的同步门极驱动器,需要保护回路。	集成式门极驱动器。
触发控制类型	开环正弦双极脉宽调制 SBPWM 控制 IGBT 桥开关状态	定子旋转磁链和电磁转矩联合控制 IGCT 桥开关状态。
速度控制	用脉冲编码器,精确的速度反馈控制和转矩控制。	直接转矩和速度控制,不需要脉冲编码器。
动态特性	动态转矩响应较慢,启动转矩大,零转速能悬停最大钻柱载荷。	动态转矩响应快,启动转矩大,零转速能悬停最大钻柱载荷。
变频器输出 电压波形	经输出滤波器,电压、电流为不平滑的近似正弦波形。	经正弦输出滤波器,电压、电流为光滑的正弦波形。
整体设计	较紧凑,布线和连接较复杂,控制柜的尺寸较大。	很紧凑,布线和连接简洁,控制柜的尺寸较小。
可靠性	调速系统给定信号与反馈信号经过二次变流,转子参数计算量大,部件元器件数量较多,可靠性较高。	直接转矩控制系统简洁,部件元器件数量少,可靠性高。
效率	开关损耗高,导通损耗较高,效率较低。	开关损耗低,导通损耗低,效率较高。

参考文献:

[1] 廖谟圣,杨本灵.世界石油设备发展的新特点及机遇与挑战[J].石油矿场机械,2007,36(9):1-6.
 [2] 陈如恒.电动钻机的工作理论基础(二)[J].石油矿场机械,2005,34(4):1-8.
 [3] 陈如恒.电动钻机的工作理论基础(二)续[J].石油矿场机械,2005,34(5):1-6.
 [4] 高景德,王祥珩,李发海.交流电机及其系统的分析[M].2版.北京:清华大学出版社,2005:347-383.