

一种新型液压蓄能石油钻机设计*

董怀荣¹ 顾心怿¹(中国工程院院士) 张慧峰² 王平²

(1. 石油大学机电系·华东 2. 胜利石油管理局钻井工艺研究院)

董怀荣等. 一种新型液压蓄能石油钻机设计. 天然气工业, 2004; 24(5): 61~64

摘 要 目前我国石油钻机品种和质量基本上满足了国内不同地区、不同井深的需要, 但与国外先进石油钻机相比还有较大差距。为此, 文章设计了一种新型液压蓄能钻机。主要介绍了其设计原则和思路、系统总体设计方案、技术指标和技术关键。还阐述了其蓄能、节能原理。它的主要优点有: 充分发挥了液压传动优势, 合理地蓄能、用能, 节能效果好, 整机配置合理等。这种钻机具有我国独立的知识产权, 并已取得了中国、美国和加拿大专利。

主题词 钻机 液压 蓄能 设计

随着石油工业的发展, 钻机也在不断更新, 钻井能力越来越强, 功率越来越大, 传动越来越先进, 机械化、自动化程度越来越高。特别是电驱动钻机^[1], 正在不断扩大应用。目前我国石油钻机品种和质量基本上满足了国内在不同地区、不同井深进行油气钻井的需要。进入 20 世纪 90 年代, 我国石油钻机研制开发的速度明显加快, 相继开发了 1000~7000 m 七大系列新型石油钻机。直流电传动、交流变频电传动、机械传动、液力传动等多种驱动方式得到了比较普遍的应用; 液压盘式主刹车、气动推盘式辅助刹车、自升式底座、伸缩式井架、轮式半拖挂整体移运等新技术日臻成熟, 钻机研制开发整体水平取得了长足的进步, 已能基本满足国内对原有钻机进行更新改造和升级换代的要求。但与国外石油钻机的整体水平相比还存在较大差距, 主要表现在以下几个方面: ①品种少, 型号单一, 规格不全, 适应能力差, 产品结构不合理, 不能满足各种不同钻井工况的需要, 有些品种钻机不得不依靠进口, 某些零、部件、基础件更是缺乏选择的余地。②在用钻机普遍老化, 更新速度太慢, 严重影响着我国新型钻机的发展。机械化、智能化进程滞后, 影响钻井速度和井身质量的进一步提高。③在用钻机中先进钻机太少,

97% 是机械驱动的钻机, 而且中型钻机模块化程度低, 钻机搬家占用的车次和时间很多。对于已经生产的石油钻机, 有的主机与国外差距不大, 但总体方案尚不能满足具体地区与钻井工艺要求。④各部件之间的合理配置还有待优化。⑤整个石油钻机研制工作基本停留在仿造与跟踪阶段, 创新比例较小。

但只是跟踪还不够, 还要创新, 才能超越。我们研制的液压蓄能钻机或修井机就是一个全新的设想, 具有我国独立的知识产权, 并已取得了美国、加拿大专利。该项技术由于其独特的构思和具有明显的节能等优点而曾获 1995 年国际知识产权组织和中国专利局共同颁发的中国发明专利创造金奖。其中作为该专利实施项目之一——液压蓄能修井机已经投入工业应用, 并获得了 2002 年度国家发明二等奖。我们根据液压蓄能修井机研制经验, 现在又着手研制液压蓄能钻机。由于采用统一的液压源, 系统简单, 无工作火花, 特别适合于钻天然气井、欠平衡钻井等。本文就液压蓄能钻机设计方面的问题, 进行总结。希望能对类似的设备研制, 起到抛砖引玉之作用。

技术路线

(1) 设计原则与思想。根据“液压蓄能修井机

* 本文系中国石油化工集团公司重点科技攻关项目(编号 JP02024)。

作者简介: 董怀荣, 1969 年生, 高级工程师; 现为石油大学(华东)在读博士研究生, 主要从事机械设计及理论方向研究工作; 已获得国家专利 5 项。地址: (257017) 山东省东营市商河路 85 号胜利石油管理局钻井工艺研究院机械所。电话: (0546) 8554121。

或钻井机”专利^[2]的思想,采取液压驱动方式,充分发挥液压传动的优势。在能量利用方面,回收蓄存管柱下放时释放的部分势能,达到节能和降低整机配置功率的目的。设计上采取优化设计理论和模块化设计,使得结构紧凑,具有良好的工艺性和运移性。①钻机总体方案及基本参数符合 SY/T5609—1999《钻机型式与基本参数》的规定,并注意符合 API 规范,钻机的配套部件应符合 API 规范及国家标准和行业标准的有关规定。②钻机性能要满足现代钻井工艺的需要,要最大限度地完成全部技术功能,具有较高的生产率 and 运行指标,安全节能。③采用模块化设计,要具有良好的结构工艺性,系列化、通用化、标准化水平高,运移性好。④采用先进的、成熟的、可靠的技术,可靠性要高、寿命要长,维修保养方便。⑤自动化水平要高,操作省时、省力。⑥钻机要符合 HSE 要求。⑦发挥社会化、市场化优势,实现配套设备要素的优化,用“谁的设备性能价格比和可靠性高,就选用谁的设备”的原则处理国产和引进的关系、国内各有关厂家产品的关系。

(2)系统总体方案设计。采用液压驱动型式,充分发挥液压驱动的优势,充分利用液压蓄能系统,尽可能节能,以降低钻井成本。采用 3 个 $\varnothing 320$ mm 的液缸刚性组合型式作为该钻机的起升与下放系统,3 个液缸端部采用刚性联接成一体,并与桁架式顶杆相连,通过滑轮增距系统与大钩相连,以完成起升与下放立根的工作。旋转系统仍然采用液马达驱动型式的液压转盘组成。但起升系统结构设计时考虑采用顶驱安装的要求。每台改进型 SL3NB—1300 A 型钻井泵采用两台大功率液马达驱动,并能方便、快捷地实现调节泵速以充分满足钻进过程中对钻井泵排量与压力的要求。整套钻机采用一套统一的液压系统,从而省去液压大钳、顶驱、封井器等若干单独的液压源,使系统简化、统一。便于实现自动送钻、各种转速的控制和无级变速等各种自动控制。这种钻机不再有联动机组、井架、绞车等设施,高度大为降低,搬迁安装方便,能量利用十分合理,节能显著。该钻机研制成功后,将成为一种真正“中国式”的先进液压钻机。

技术指标

该钻机基本参数符合 SY/T5609—1999《钻机型式与基本参数》的规定,并注意符合 API 规范。主要

参数如下。

(1)型号:ZJ30/1700Y 型液压蓄能钻机,液压驱动 3000 m 钻机。

(2)名义钻井深度:用 $\varnothing 127$ mm 钻杆最大钻深 2500 m,用 $\varnothing 114$ mm 钻杆最大钻深 3000 m。

(3)起升能力:(钩载)正常情况下为 1200 kN,遇卡情况下可上拔至 1700 kN。

(4)起升速度:1200 kN 钩载时可达 1 m/s,其它工况可以手动控制。

(5)起升高度:能满足起立根的要求。

(6)钻台高度:5 m(如考虑欠平衡等特殊钻井工艺时,可以加高至 7.5 m)。

(7)油缸行程:大钩行程增距 = 1 : 3 (9.5 m : 28.5 m)。

(8)二层台高度:钻台以上 25.5 m。

(9)起升导向架高度:分上下两层高度均为 13.5 m,总高度为 27 m。

(10)蓄液缸:内径为 $\varnothing 500$ mm,长 10 m,容积为 1963 L,蓄液缸总高度约 11 m。

(11)氮气包的总容积为 15.3 m³,重量为 22.5 t,每根管外径为 $\varnothing 610$ mm、长 7.315 m,共 9 根。

(12)柴油发电机组功率及台数:2 台,功率各为 1000 kW,型号为 CAT3512DITA。

(13)液压系统工作压力:16 MPa。

(14)钻井液循环罐有效容积:240 m³。

(15)钻井泵功率:960 kW (1300 HP),数量:两台。

技术关键

该液压蓄能钻机设计中,主要解决的技术关键有以下几个方面。

(1)液压蓄能系统的理论及其设计是该项目的核心技术。

(2)液压蓄能起升与下放系统。

(3)顶部驱动装置的配套或液压旋转系统(液压转盘)设计。

(4)自动送钻装置的设计。

(5)新型钻台(底座)和起升系统(含组合油缸)设计技术。

(6)钻机电、气、液控制系统。

(7)井口提升液压绞车设计。

(8)动力泵站系统设计。

(9) 钻井泵的改进设计, 实现钻井泵的调节和自适应性。

蓄能、节能原理

蓄能系统包括高压蓄液缸(大型气液联动蓄能装置)和与之相连的高压氮气包、充气装置、液位检测、显示与控制装置等, 实际上是一个可以控制油流进出的超大型的液压蓄能器。一口井有数千米的钻杆, 若在起钻时, 理所当然要消耗能量。但从能量平衡角度出发, 这些能量并没有消失, 只是转移而已, 绝大多数是以位能的形式储存到井场的钻杆中。再下放时, 这些能量又回释放出来。以前, 在下钻时只能依靠刹车片的发热来消耗了, 而没有储存起来。同时, 柴油机仍然在不停运转, 消耗了更多的燃油, 造成能量浪费。蓄能系统主要作用就是将下放钻杆时的能量储存起来, 同时将液压动力系统输出的压力油通过组合油缸后也将其大部分储存到蓄能系统中, 而不是阀组的压力损失回到油箱, 另外能将动力空载运行时的能量也储存到蓄能系统中。蓄能系统中储存的压力油可以通过操作控制系统, 再进入组合油缸用于起升钻杆或其它辅助系统用。这样一来, 在起钻时可以充分利用蓄能系统中能量, 不足部分再利用液压动力系统补充, 从而达到节约能源、降低装机容量的目的。实现了有效蓄能、按需能用、按需配能和有效控制的能量合理分配使用的目的。

系统或部件设计

液压蓄能钻机也是一种成套重型机械设备, 涉及的系统、零部件非常多。主要有起升系统、液压转盘、柴油机或 AC 电动机液压泵动力系统、蓄能系统、钻台和底座、钻井控制室、钻井液循环系统等组成。本文限于篇幅, 只介绍液压蓄能钻机与其它常规钻机不同之处, 而且只介绍部分主要的系统或零部件的设计, 其余可参考常规钻机的设计或选用现有成熟的设备进行配套。

(1) 起升系统设计。起升系统主要有组合油缸、顶杆、游动滑轮组件、提升钢绳、平衡器组件、起升导向架等组成。起升导向架与常规井架不同的是, 它不承受载荷, 而由组合油缸以及与之相连的顶杆承受。起升导向架分上下两层, 长 5 m 左右, 宽 1.5 m 左右, 高度均为约 13.5 m。运移时, 上层套在下层中, 下层外部有直梯, 上层内部有直梯可登攀。上层

内有导轨供桁架式顶杆在其中上下滑动并对桁架式顶杆作导向及扶正。组合油缸与顶杆相连, 安装在起升导向架内。顶杆上部设死绳固定端、平衡轮及游动滑轮。游动滑轮直径 $\varnothing 2.25$ m, 以保证导向架前端导转盘中心的距离不小于 1.5 m。组合油缸和固定绳轮均安装在导向架的下部底座上, 并紧固在钻台上。指重表传感器安装在一根绳的下端, 有一根软管连接到指重表。指重表传感器的信号通过调节器、节流制动阀形成一个闭环控制系统, 即可实现自动送钻。组合油缸是该钻机的关键, 它采用相同的三只油缸组合而成, 活塞直径 $\varnothing 320$ mm, 活塞杆直径 $\varnothing 280$ mm, 每只油缸全行程 9.5 m。通过三只油缸 A 腔、B 腔不同连通组合形式, 形成不同的压力容积, 从而形成不同各个力档, 一共可以形成 12 个档位。系统的额定压力为 16 MPa。处理事故时, 应切断蓄能系统, 并将油缸增压到 21 MPa。优点是制造维修简单, 可细分许多档, 节能效果好。

(2) 蓄能系统设计。根据蓄能、节能原理, 对蓄能系统设计时, 应钻井工况要求进行。按事故档全行程 9.5 m 需压力油约 2280 L, 考虑到同时油泵也在供油且实际行程要小于 9.5 m, 故蓄液缸的容积小于 2000 L 就足够了。蓄液缸内径可用 $\varnothing 500$ mm、长 10 m, 其容积为 1963 L, 蓄液缸的总高度约 11 m。蓄液缸中间设有浮动活塞一只, 以隔开油和气。蓄液缸液位的监测与控制: 蓄液缸缸底设有超声波液位计一只, 超声波在油内传播, 遇到浮动活塞后, 反射回来, 即可测出液位的高低, 供显示和控制用, 并反馈给控制系统, 判断是否供油。蓄液缸的油位信号 $\rightarrow$ 调节控制器 $\rightarrow$ 液压泵的电动卸荷阀 $\rightarrow$ 油位组成另一个闭环控制, 以保证蓄液缸内油面始终不少于一定值。蓄液缸可考虑布置在导向架内的一侧, 在蓄液缸上方布置高位油箱。蓄能系统中氮气包的容积一般应为蓄液缸的 8~10 倍, 故氮气包的容积应为 15~20 m³。可采用美国 CPI 公司的无缝钢管气体高压容器 SA372 型的管 9 根就可以, 组装在一个半挂拖车上, 总容积为 $1.705 \times 9 = 15.3$ m³。重量为 22.5 t, 每根管外径为 $\varnothing 610$ mm、长 7.315 m。

(3) 转盘系统设计。如果用液压蓄能系统带动转盘时, 应采用变量马达。即系统供油压力 p 虽然基本恒定不变, 但在要求的转盘转速 n 下, 尽管转盘扭矩 T 随时变化, 液压系统的供油流量 Q 也可以随时变化, 这样始终能做到使液马达的输出功率 $N_1 =$

$Qp c_2 \eta$ 等于转盘的需用功率 $N_2 = T n c_1$, 即: $Q = T$

$\left(\frac{n c_1}{p c_2 \eta}\right) = T c_3$, 其中系数 $c_3 = \frac{n c_1}{p c_2 \eta}$, η 是马达效率, 是一个常数; c_1 和 c_2 是常数; p 是系统供油压力; n 是转盘转速; T 是转盘扭矩; Q 液压系统给马达的供油流量。这样在某一恒定的转盘转速 n 和恒定的系统供油压力下, c_3 也是常数。为此, 要保证转盘转速 n 恒定且有不同的输出扭矩, 就可以通过调节系统的供油流量 Q 来实现。当然系统的供油流量就可以采用蓄能系统储存的压力油。这时的用能也十分合理, 这也是液压蓄能钻机的突出优点在驱动转盘时的充分利用。可见, 转盘驱动也可以利用本来已有的蓄能系统而得以优化。如果采用顶驱, 其驱动原理和转盘设计是一样的, 在此不在赘述。

(4) 钻井泵改进设计。钻井泵设计功率 1300 马力 (960 kW), 基本参数按 SL3NB—1300 A 型钻井泵设计规范。液力端还是与 SL3NB—1300 A 型钻井泵相同。动力端采用直轴加偏心轮型式的曲柄连杆机构进行改进, 动力端只有一根传动轴, 不再有大小齿轮等传动件, 避免了齿轮、原主动轴及其轴承损坏的故障, 从而使钻井泵制造与使用成本大大降低, 泵的可靠性更高, 故障率显著降低。每台改进型 SL3NB—1300 A 型钻井泵采用两台大功率液马达直接驱动泵轴。发挥液压传动优势, 并能方便、快捷地实现泵速在 70~125 r/min 范围内无级可调, 以充分满足钻进过程中对钻井泵排量与压力的要求, 不再需要更换缸套、活塞的方法来调节钻井泵排量, 省时省力。

结 束 语

液压蓄能钻机^①采取全新的设计思想, 具有我国独立的知识产权。它充分发挥了液压传动的优势, 合理地蓄能、用能, 达到节能和降低整机的配置功率目的, 钻进时可不配备很大的驱动功率也能避免瞬时转盘扭矩尖峰可能引起的“堵转”现象。它从原理、结构到外型均不同于国内外传统的钻机。它没有井架、绞车、天车、联动机组和摩擦制动系统, 整机制造成本大大降低。通过液压控制系统、绳轮增距系统启动组合油缸完成起下钻, 通过转盘等旋转系统实现钻进, 杜绝了“顶天车”事故的发生, 可降低成本。更适合于采用新的钻井工艺, 如套管钻井新工艺等。该钻机将是我国第一台液压蓄能钻机, 已经申报了国家重点新产品计划, 目前已完成方案设计, 正在进行详细的零部件图纸设计阶段。当然液压蓄能钻机投入生产、工业应用和批量推广, 还需走很长一段路, 还需做大量的工作。但是作为本专利另一种实现形式——液压蓄能修井机, 已经研制成功并投入工业应用, 取得了显著的经济与社会效益。因此我们项目组也非常有信心, 将该钻机研制成功。这对促进我国钻机的发展, 提高我国钻机的研制水平, 缩短与国外钻机的差距, 都具有特别重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Composite catalog of oil field equipment & services. Published by gulf publishing company. USA, 1998~1999

(收稿日期 2003-11-28 编辑 钟水清)

①顾心悻, 王运安, 潘伟等. 液压蓄能石油修井机或钻井机. 中国专利号: ZL91106336. 6。