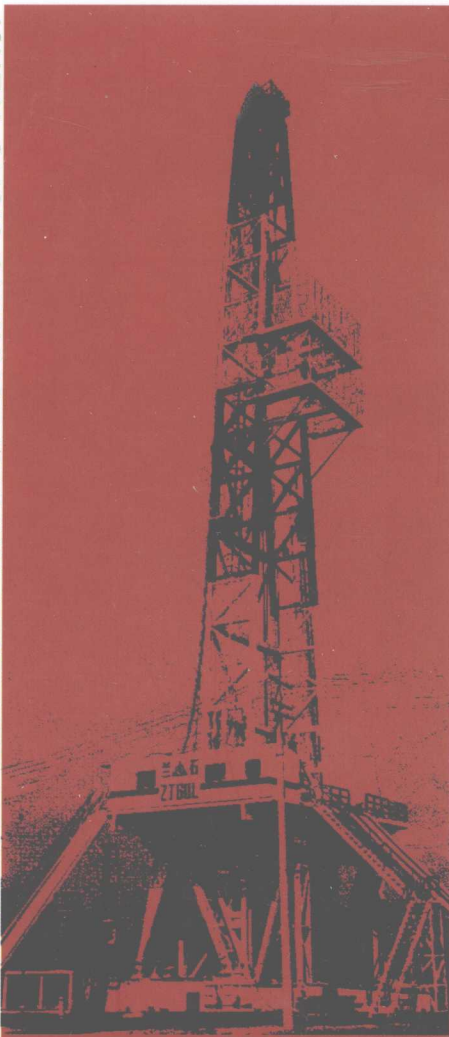


松辽盆地

石油天然气钻井技术文集

张书瑞 著

SONGLIAO PENDI SHIYOU TIANRANQI ZUANJING JISHU WENJI



石油工业出版社

松辽盆地石油天然气 钻井技术文集

张书瑞 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

石油工业出版社

内 容 提 要

本书收集了1991—2007年作者在松辽盆地和海拉尔等外围盆地钻井实践认识和主要研究成果,内容涉及优化钻井、高温钻井、气井固井、欠平衡钻井、水平井钻井、气体钻井、工程事故预防及处理技术等。

本书可供钻井工程技术人员、管理人员,以及石油院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

松辽盆地石油天然气钻井技术文集 / 张书瑞著.

北京:石油工业出版社,2008.10

ISBN 978-7-5021-6795-0

I. 松…

II. 张…

III. 含油气盆地-油气钻井-东北地区-文集

IV. TE242-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第154075号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2008年10月第1版 2008年10月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:20.25

字数:523千字 印数:1—2000册

定价:80.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

大庆油田的勘探开发既是一部创业史，也是一部科技创新史。几十年来，钻井技术在油田原油持续高产稳产中发挥了重要作用。

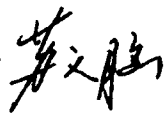
大庆油田地处松辽盆地北部，具有地温梯度高、岩石硬度大、研磨性强和可钻性差等特点；勘探钻井施工条件恶劣，钻井施工难度较大。油田勘探开发钻井，从浅层到深层，由易到难，先后进行了深井、水平井、小井眼钻井，以及分支井、套管钻井、地质导向钻井、气体钻井等施工。通过广大科技工作者不断攻关研究，大庆油田钻井取得了一大批科研成果，形成了以深井钻井为代表的钻井技术系列，使大庆油田钻井技术在理论和实践上均迈上了一个新台阶。

本书作者是中国石油大庆钻探工程公司钻井一公司的总工程师，大庆石油学院在读博士研究生，曾获全国“五一”劳动奖章，是中国石油天然气集团公司的高级钻井技术专家、大庆油田新时期五大标兵之一，有二十几年的现场钻井技术工作的经历。其亲历了大庆油田近一时期深井钻井技术发展的全过程，主持和参与了多项省部级科研项目的研究工作。在工作中肯钻研、善创新，解决了多项钻井生产技术难题，对大庆深井钻井技术发展做出了突出贡献。作者在繁忙的工作之余，勤于笔耕，高度关注钻井技术的创新与发展，认真思索和总结生产实践经验，并在一定深度上进行理论探索，撰写成文，这是十分难能可贵的。

本书收录了作者“八五”以来撰写的科技论文 50 篇，凝聚了作者的智慧和心血。这些论文从不同方面总结了大庆钻井技术的新进展，覆盖面广，实践性强，重点突出了大庆深井钻井技术；其中优化钻井技术、高温钻井技术、欠平衡钻井技术、井下复杂预防技术等，具有鲜明的大庆油田钻井特色；钻井参数多目标可靠性优化方法和人工神经网络优选钻头新方法等都紧密结合实际，具有较高的学术水平和实用价值。

我相信，该论文集的正式出版，将对石油钻井技术人员及高校相关专业师生具有一定的参考价值，并对今后大庆钻井技术的发展起到积极的推动作用。

中国工程院院士



2008 年 7 月 于北京

目 录

大庆外围探井钻井速度的影响因素分析	(1)
人工神经网络在大庆深井钻头优选中的应用	(6)
钻头优选的属性层次模型及应用	(11)
大庆庆深气田深井快速钻井技术	(16)
大庆油田深层气井固井技术	(20)
南 246 - 平 309 阶梯水平井井眼轨迹控制技术	(26)
减震器的位置对钻柱纵向振动的影响	(31)
徐家围子深井高温复合钻井技术的试验研究	(40)
深井钻井参数多目标可靠性优化	(44)
应用录井资料求地应力剖面	(49)
大庆油田提高深井钻井速度的措施及效果	(54)
大庆长垣东部地区中深井钻头序列的评选	(58)
基于随机钻井模式的钻井参数优化方法	(63)
预防深井钻具失效的实践及认识	(69)
多元随机钻井模式理论及其应用	(75)
牙轮钻头冲蚀原因分析与建议	(82)
排量对机械钻速影响的统计分析	(86)
加长喷嘴 TJ ₂₂ 钻头在大庆油田的推广应用	(90)
不钻塞分级箍在大庆地区的应用	(95)
偏重偏轴防斜工具的研制与应用	(99)
有效利用水力能量方法的探讨	(106)
大庆 $\phi 311\text{mm}$ 井眼井壁稳定问题分析与研究	(110)
空气钻井在徐深 21 井的应用与认识	(114)
徐深气田深井提速配套技术试验与效果	(118)
大庆徐家围子深井提速现场试验效果与认识	(125)
自适应共振神经网络法优选钻头技术研究	(133)
深井事故处理工具的研制与应用	(137)
英台地区垂直裂缝防漏、堵漏技术研究与应用	(141)
大庆油田深井钻具失效统计规律的研究	(153)

欠平衡钻井技术在大庆油田深层天然气勘探钻井中的应用	(160)
葡深 1 井钻井工艺技术	(167)
进一步提高深井钻井技术 更好地适应油田勘探需要	(173)
松辽盆地北部保护油气层的勘探钻井技术	(181)
Case Histories of a Horizontal Well in the Fissured Mudstone Formation of Daqing Oilfield	(192)
火山岩水平井井眼轨迹控制技术	(202)
保护扶杨油层的钻井施工技术	(207)
英台地区钻具防断技术探讨	(216)
深井满眼和钟摆钻具防斜性能分析评价	(222)
数字视频多媒体技术在井控教学中的应用与研究	(230)
徐深 1 井钻井实践及认识	(236)
利用测井声波时差曲线确定岩石可钻性的方法	(241)
金系列 PDC 钻头在大庆油田深井上的应用	(245)
模糊决策在优化钻井中的应用	(249)
浅气层井防喷应用技术	(256)
浅析葡萄花油田井身结构的改进	(264)
大庆油田深井钻井技术回顾与展望	(268)
龙虎泡地区 PDC 钻头脱扣原因分析及对策	(274)
悬浮钻井工艺技术在在大庆油田深井上的应用	(277)
浅谈提高松辽盆地北部深井钻井速度的途径	(281)
钻井参数单因素对机械钻速影响规律的研究	(291)

大庆外围探井钻井速度的影响因素分析

摘要：对影响大庆外围探井钻井速度的地质因素及钻井工程技术因素（井身结构、钻井设备和钻井液）进行了分析；制定了合理的设计方案和井身优化结构，通过合理地降低上部大井眼岩屑切削面积及合理地增加中下部复杂井段井身结构；采用了先进的钻井工艺技术；并进一步优选了钻头，试验和推广了低压和负压钻井等新工艺、新技术；加强了对固控技术的研究；改进了现有钻井工艺。这些技术措施的实施提高了大庆外围地区深探井的钻井速度。

关键词：大庆油田 深井 探井 钻井工艺 钻井速度 影响因素

在大庆外围深井钻井过程中，常常遇到高硬度、可钻性极差的岩石，以及因受到深层高温高压的影响，导致井壁不稳定，有易剥落的砾岩层，从而发生钻具失效、井斜和卡钻等各种复杂情况。为了安全高效、快速、优质地钻深井，在综合分析国内深井钻井技术现状，以及制约深井钻井速度因素的基础上，根据区块的特点，研究了影响大庆外围探井钻井速度的主要因素。针对不同的影响因素，在井身结构优化、设备配套方案、钻井参数设计、钻头选择、钻井工艺技术、钻井液、井下钻具组合设计、钻具防失效等方面进行了分析和探讨。

1 外围深探井钻井速度的主要影响因素

1.1 地质因素

影响外围深探井钻井速度的地质因素包括以下方面。

(1) 所钻地质年代较多，地层岩性复杂。

大庆外围地区深井所钻地层跨越的地质年代较大，地质条件变化大，岩性复杂，特别是在新的探区尤为严重。深井钻遇的地层自上到下依次为第四系、古近系和新近系、白垩系、侏罗系、基岩。其中，白垩系由地层复杂的四方台组、嫩江组、青山口组、泉头组、登娄库组、营城组和沙河子组组成；侏罗系由浅到深依次是火石岭组、姚南组、白城组。

(2) 深部地层硬度大，岩石可钻性差，在纵向上砂泥岩互层且存在砾石层。

井深超过2700m（登娄库组）地层的可钻性级值为6~10级，其中砾石层可钻性级值高达10.38级；井深在3000~4100m的营城组和沙河子组的地层可钻性级值为7~9级。对于该区块深部井段，在高温高压的作用下，岩石可钻性变差。一些泥岩、泥质砂岩也由常压下的脆性向塑性或弹塑性转化，破碎这种地层特别困难。在纵向上砂泥岩互层且存在砾石层，钻进困难且跳钻严重，降低了钻头和钻具使用寿命。

(3) 深层地层孔隙压力低，常规钻井压差大。

登娄库组、营城组和沙河子组当量密度一般约为 1.0g/cm^3 ，储层保护难度大。由于井筒和地层孔隙流体的压差作用使岩石强化，塑性和硬度增加，破碎方式也相应有了变化。在低压差下易破碎的岩石，在高压差下则塑性增大，难以破碎。另外，由于压差对刚破碎的岩屑有压持作用，阻碍岩屑的及时清除，造成重复破碎，使钻速下降。

(4) 存在多套压力系统，制约了井身结构的优化。

在上部井段有黑帝庙、萨尔图、葡萄花、高台子、扶余、杨大城子等六大油层；下部井段有泉头组一、二段、登娄库组、营城组、沙河子组等天然气储层。压力层系多而压力系数不一致，用同一种钻井液体体系很难使所有的储层都得到保护。青山口组的当量密度为 1.25g/cm^3 ，基底的当量密度为 1.0g/cm^3 左右，这增加了复杂情况发生的几率。

(5) 深部地层岩性不均质，常发生砾石块剥落，井下复杂情况发生的几率增多。

在深部地层不但宏观上岩性复杂，而且同一岩性结构也复杂。在钻井过程中，常有剥落坍塌的砾石块，致使钻头先期损坏。对于营城组流纹岩、角砾岩、凝灰岩地层，钻头的平均进尺不足 60m，起、下钻频繁。

(6) 地层温度高。

大庆外围地区平均地温梯度为 $3.6 \sim 4^\circ\text{C}/100\text{m}$ 左右，而徐家围子地区平均达到 $4.10^\circ\text{C}/100\text{m}$ ，肇州地区高达 $4.19^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。高温高压对钻井液性能影响较大，也导致钻头保径齿和切削齿脱落、井下工具密封失效和钨钢柱脱落，造成了井下复杂情况增加和固井难度增大。

(7) 地层倾角大。

登娄库组以下地层倾角大约为 $20^\circ \sim 60^\circ$ ，为了控制井身质量，常常需要轻压吊打，这就严重影响了深井的机械钻速。

1.2 钻井工程因素

影响外围深探井钻井速度的钻井工程因素包括以下方面。

(1) 井身结构。

由于深探井钻遇的地层特性复杂，需要采用多层套管的井身结构。目前比较普遍的是 3 层套管 [即 $\phi 444.5\text{mm}$ 钻头 $\times \phi 339.7\text{mm}$ 技术套管 + $\phi 331.15\text{mm}$ 钻头 $\times \phi 244.5\text{mm}$ 技术套管 + $\phi 215.9\text{mm}$ 钻头 $\times 139.7\text{mm}$ 油层套管 (或尾管) 结构] 和 4 层套管 [即 $\phi 660.4\text{mm}$ 钻头 $\times \phi 508\text{mm}$ 表层套管 + $\phi 444.5\text{mm}$ 钻头 + $\phi 339.7\text{mm}$ 技术套管 + $\phi 331.15\text{mm}$ 钻头 $\times \phi 244.5\text{mm}$ 技术套管 + $\phi 215.9\text{mm}$ 钻头 $\times \phi 139.7\text{mm}$ 油层套管 (或尾管) 结构]。但是对于深层探井来说，由于地质情况不明确，3 个压力预测存在很大误差，易漏、易坍塌层位及多套压力体系等问题都严重制约着井身结构的选择，制约着每层套管的合理下入深度。另外，由于大尺寸井眼钻头切削面积很大，效率很低，也严重影响了深井钻井速度。因此，合理选择适合本地区的井身结构和优化井身结构设计是提高深井钻井速度的关键问题。

(2) 钻井方式。

在井身结构确定以后，对于每个井段来说，优选钻井方式是提高单位井段钻井速度，进而提高整个深井钻井速度的关键因素。以往对于钻井工程来说，在上部松软地层大多是采用喷射钻井方式，主要是以水力破岩为主，机械破岩为辅，在中深部井段的中硬地层采用以机械破岩为主，水力破岩为辅的钻井方式；在深部硬地层，由于管内压力损失较大，主要采用以机械破岩为主的原则。但是这种钻井方式机械钻速很低，周期较长，一般井深为 4300m 的井，平均建井周期为 140 天左右，不能满足加快深井勘探开发的需要。

(3) 钻井设备。

在深井钻井过程中，现有的钻井装备 (包括钻机、泥浆泵、泥浆净化的固控设备、钻杆钻铤等井下钻具等) 也制约着钻井速度的提高。由于上部大直径井段要求排量较大，必须保证双泵打钻，同时没有大尺寸外径的钻杆钻铤，使上部井段钻井的井下钻压的机械能量不足；泥浆净化的固控设备不能保证泥浆中固相含量尽可能的少，目前只有部分特殊工艺

(包括水平井和欠平衡钻井等)才能实现四级固控净化设备的功能,这使得泥浆中固相含量及井下泥浆密度的增加,增大了井下压差,造成重复破碎。同时,由于钻杆钻铤内径较小,使下部井段水力能量损失过大,钻头压降较小,对井底清洗存在一定影响。深井钻机顶部驱动系统及活动基础方面的问题同样也制约着大庆外围深探井钻井速度的提高。

(4) 钻井液。

外围深层钻井液应该具有防井塌、防缩径和抗高温的能力。在钻井过程中,使用的钻井液密度应该尽可能地降低,以减少井底压差及提高钻速。作用于井底的压差是影响钻速的重要因素之一,随着井底压差的增加,钻速会大幅度降低。因此在保证正常安全钻进的前提下,使作用于井底的压差降低到最小,这是提高钻井速度的关键。另外,钻头型号优选、钻井参数优化、钻具组合和完井方式的确定都是影响深探井钻井速度的因素。

2 提高大庆外围深探井钻井速度的策略

2.1 优化井身结构

在深井钻井过程中,优化井身结构,并在上部大尺寸井段合理缩短岩屑切削面积,提高大井眼钻井速度,而在中下部复杂井段合理增加井身结构、采用先进的钻井工艺技术,以及进一步优选钻头是提高深探井钻井速度的关键性技术。从国内外钻井技术发展来看,可以从3个方面入手:

(1) 减少套管下入层次,简化井身结构,降低辅助钻井和中间完井时间,以及提高钻井速度。

将套管层次减少,简化不同尺寸结构的套管,根据地质特点合理布置不同层次套管的下入深度。在大庆外围地区,2003—2004年已经采用了这种方式。将原有的4层套管改为3层套管,改变各层套管的下入深度,将表层下入到200m左右深度;采用近平衡和普通钻井施工的深探井工艺,技术套管封至泉二段(2500m左右)底部;采用欠平衡施工的深井工艺,技术套管封至登一段(3600m左右)。

实施以上工艺减少了4层套管,使一开周期缩短了3.4天。

(2) 缩小套管下入的直径,减少钻头的切削面积,提高机械钻速。

国外深井超深井钻井中采用的套管与钻头系列的种类很多,随地区、井深、钻井目的及钻井工艺技术水平的不同而不同,套管层次有3层、4层、5层、6层、7层等。国外实践证明,在较大井眼内下入较大尺寸的导管和表层套管,通常不会明显增加费用。膨胀管、扩眼技术等一些先进技术使美国井身结构的优化方式从20世纪后期开始发生明显变化。2003年以来,套管外径已经从表层的55.88cm,降低到35.56cm,上部大井眼降低切削面积60%左右,大大提高了深井钻进速度。

(3) 根据地质特点合理设计套管层次,减少套管下入深度,在不同井段实施不同的钻井工艺,大幅度提高钻井速度。

在中国石油长城钻井公司中标的伊朗项目中,其地质条件十分复杂。在地表位于海平面以上1200m左右的Tabnak山顶上,地下裂缝、溶洞发育,全井都遇到完全漏失,而且存在大段水敏性页岩,垮塌严重。1998年伊朗国家钻井公司曾在该地区打过一口井深为3345m的T-1井,因漏失和垮塌问题严重,主要靠盲钻、油基钻井液和水泥段塞堵漏完成钻井进尺,建井周期为402天。中国石油公司在该地区所钻的第一口井T-2井,井深为3300m。

虽然采用了空气、泡沫等先进的钻井技术，但是由于套管层次和下入深度以及工艺技术不完善，钻井周期为 193 天。随后，中国石油公司在该地区合理设计套管层次，确定了 6 层井身结构。将上部大尺寸套管的下入深度进一步缩短，简化了钻井工艺流程，在不同井段实施不同的钻井工艺。T-15 井的深度为 3120m，钻井周期仅为 50 天。

2.2 采用低压或负压钻井工艺

深井钻速低的一个很重要的原因：由于深井压差大，钻井液对井底的岩石和对钻头破碎产生的岩屑压持作用大。地层越深，压持程度越大，岩石强度也逐渐增大，而且巨大的液柱压力会压住即将脱离母体的岩屑。液柱压力和地层孔隙压力的差值越大，这种情形会更加严重，岩屑在井底被重复破碎的次数会增多。传统的钻井工艺方式已经不能满足现代勘探开发钻井的需要。从 20 世纪 90 年代以来，以降低井底压力、减少压持效应的流钻欠平衡、充气、泡沫、气体等钻井方式相继发展并逐渐完善。截至目前，在四川油田已经进行了 35 口井的气体钻井试验。其中，天然气欠平衡钻井 8 口，空气钻井 27 口。长庆油田在陕 242 井、苏 35-18 井、苏 39-14-1 井、苏 39-14-4 等井进行了天然气钻井现场试验。分别在西峰油田和苏里格气田镇 206 井、苏 33-8 井、苏 38-19 井进行了空气钻井试验，大幅度地提高了钻井速度。大庆油田在外围地区的升深 2-17 井进行了充气钻井技术试验，机械钻速提高了 30% 以上；在徐深 21 井进行了空气钻井和充气钻井的现场实验，其机械钻速与同区块的普通钻井方式相比提高了 4~6 倍，取得较好的效果。因此，在大庆外围地区采用充气泡沫、雾化和气体钻井技术，可以大幅度地提高深探井钻井速度。

2.3 井下动力钻具复合钻进

随着聚晶金刚石复合钻头（PDC）的开发和发展，给井下动力钻具的应用提供了巨大的潜力，这一技术现已成为提高钻速的一项重要技术。在 2004 年大庆深井提速现场试验中，在徐深 601 井采用 E517G 牙轮钻头和螺杆进行了复合钻井试验，使单只牙轮钻头机械钻速提高 14.9%。但由于牙轮钻头对高转速适应性较差，未完全达到目的。在升深 202 井采用 DSX259 型 PDC 钻头和螺杆进行了复合钻井试验，使 PDC 钻头钻速提高了 41%。

试验证明，引进 PDC 钻头、采用复合钻井技术是提高深井泉一段至登娄库组钻速的主要技术手段之一。同时，应该加大涡轮钻具在大庆外围深层的应用研究，进一步提高复合钻进技术的应用效果。

2.4 固相控制技术

在提高机械钻速的综合配套技术中，固相控制技术是国内发展较晚、发展速度较慢的技术之一。实践表明，固相控制技术中的关键是固控设备，应该开展超级振动筛（筛网为 150~200 目）、大功率除砂清洁器、除泥清洁器、离心式砂泵、离心真空除气器、灌注泵、414 型离心机、518 型大排量离心机及钻井循环罐等固控设备的研究，同时还应对固相化学清洁剂进行研究。实验结果表明，清洁剂具有较强的抑制性，可以有效地抑制粘上水化分散、絮凝结屑，保证钻井液清洁，在钻井液体系中可很好地与阴离子型、阳离子型和两性复合离子型处理剂配伍，同时具有较好的抑制增效作用，在有效的剂量范围内对钻井液的滤失量和流变性的影响较小。中原油田加大了对固相控制技术的投入，既提高了机械钻速及井身质量，又延长了钻井设备的寿命，减少了井下复杂情况的发生，大大降低了钻井的综合成本。因此，对深井来说，固相控制技术的研究和综合应用可以极大地提高生产时效。

2.5 抗高温钻井液技术

随着世界各国深井和超深井钻井数量的不断增加，深井钻井液也得到了发展。新型抗高

温钻井液在高温、高压条件下应具有良好的热稳定性,不发生降解作用和由活性粘土引起的高度分散。大庆钻井工程技术研究院与中国石油大学(北京)合作研制了抗高温油基和水基钻井液体系。1999年在葡深1井井底温度为220℃的高温下进行了抗高温油基钻井液体系的现场应用;2002年又在徐深1井200℃左右的高温条件进行了现场应用,均取得了较好的效果。目前抗220℃高温的水基钻井液体系正在现场应用,并具备了抗220℃高温的性能。但是,随着深井数量和钻井深度的增加,井底最高温度已经超过220℃,甚至达到240℃以上。大庆钻井工程技术研究院研制了油基和水基两种抗高温钻井液,室内研究抗高温指标均已超过240℃,满足了深探井钻井的要求。

另外,针对目前钻井投入少的特点,试验应该以机械破岩为主的冲击和振动,以及以水力破岩为主的超高压水射流和水力脉动钻井技术,力争找到一条提高大庆外围深探井速度的新途径。

3 结 论

(1) 根据地质特点,合理地设计和优化井身结构,适当地改变套管结构;在不同井段采用不同钻井工艺技术,这是大幅度提高大庆外围深探井钻井速度的主要手段。

(2) 试验负压钻井工艺技术,将气体钻井、雾化钻井、泡沫钻井和充气钻井技术有机结合,在大庆外围深探井大幅度提高机械钻速。

(3) 集试验地面固控设备、井下机械破岩及水力脉冲破岩等钻井工艺技术,为提高大庆外围深探井钻井速度提供新的途径。

该论文与周英超、刘永贵合作完成,发表在《石油学报》2007年第2期,排名第二。

人工神经网络在大庆深井钻头 优选中的应用

摘要：针对大庆地区深井地层硬、温度高、倾角大等特点；将对深井钻速影响较大的 12 个因素作为输入层神经元，建立了人工神经网络优选钻头方法。该方法将钻头优选的定量方法和定性方法相结合，使钻头优选结果更加可靠。针对侏罗系高硬度、强研磨性等特点，研究并试验了几种特殊类型的钻头。根据对新型钻头钻井结果及以往大庆深井钻井所用钻头数据的统计分析，建立了大庆地区钻头应用情况数据库。在此基础上，应用人工神经网络法对大庆油田深井使用的钻头进行了优选，在大庆 2 口深井进行的现场试验表明，钻井速度提高了 20% 以上。

关键词：人工神经网络 机械钻速 深井钻井 钻头 优选 自适应共振理论

深井、超深井技术是勘探和开发深部油气资源的必不可少的关键技术。大庆油田地处松辽盆地北端。大庆地区深井钻井的地质特点：

(1) 深部地层硬。泉二段以下地层，可钻性级值为 4 ~ 10.5 级，硬度为 2000 ~ 5000MPa。

(2) 井底温度高。平均地温梯度接近 $4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，4000 ~ 5000m 深井的井底温度为 160 ~ 200 $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 地层倾角大。登娄库以下地层的倾角为 20° ~ 60° 。

(4) 地层裂缝发育。侏罗系裂缝纵、横、斜交错，宽度达几毫米。

上述特点决定了大庆地区深部地层钻井的难度较大。因此，提高深井钻井速度和防止井斜问题已成为大庆深井钻井的技术关键；研究地层的岩石特性，优选与之相适应的钻头类型，是提高深井钻井速度的关键。

近年来，人工神经网络技术研究越来越受到人们的重视。在石油工业中具有很高的实用价值。例如，人工神经网络已应用在根据测井资料进行岩性识别、波形识别、曲线对比、参数计算等方面，也可用于地震资料的识别、试井解释模型识别、地震道编辑、钻头故障诊断、抽油机示功图识别等，并且取得了良好的应用效果。钻井过程中，影响深层钻速因素众多，情况也很复杂，存在着许多模糊因素，且各因素对结果的影响都难以用定量公式精确地表达出来，而用人工神经网络方法就能解决这一问题。

1 人工神经网络的基本原理

人工神经网络系统是有大量的、同时也是很简单的处理单元（或称神经元），并广泛地互相连接而形成的复杂网络系统。它反映了人脑功能的许多基本特性，但它并不是人脑神经网络系统的真实写照，而只是对其作某种简化、抽象和模拟。一般认为，神经网络系统是一个高度复杂的非线性动力学系统。虽然每个神经元的结构和功能十分简单，但大量神经元构成的网络系统的行为是十分复杂的。

人工神经网络模型有几十种，目前应用最广泛的是误差反向传播神经网络（Back - Propagation Neural Networks，简称 BP 网络）。这种神经网络具有：一个由相互独立的许多神

经元构成的输入层，用于输入相关数据信息；一个或者多个隐层，用于分析、模拟过程中复杂的中间计算；一个输出层，输出运算和模拟结果，如图 1 所示。

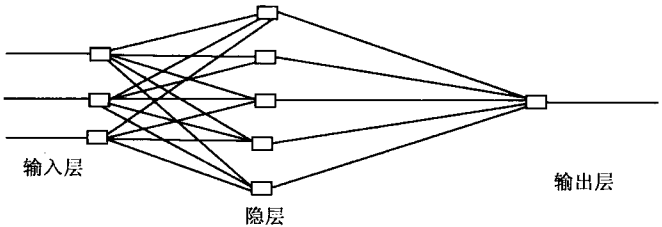


图 1 误差反向传播神经网络结构简图

误差反向传播神经网络运算过程，由正向传播和反向传播组成。在正向传播中，信息从输入层神经元输入，然后传播到各隐层神经元，再经过转换函数输出，依次传播到输出层，最后得到结果。每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态。如果输出结果和期望结果不一致，达不到所要求的精度则转入反向传播。误差从输出层传播到输入层，调整各神经元隐层输出层之间的连接权值，然后再进行正向计算，直至网络输出期望值达到所要求的精度为止。

自适应共振理论神经网络（Adaptive Resonance Theory，即 ART），主要由两层神经元，即输入层神经元（用于输入与钻头优选相关的数据信息）、输出层神经元（输出钻头类型优选结果）及一些控制部分（用于分析、判断计算结果是否准确）组成。

自适应共振理论神经网络使用前向连接权及数据组的输入来计算某组数据与各种钻头类型的符合程度，即输入神经元与输出神经元的匹配值。通过输出神经元之间的横向联合，具有最大匹配度的输出神经元的活跃程度得到进一步增强，而其他输出神经元的活跃程度逐渐减弱，直到最后找到活跃度最大的神经元，该神经元被选中为“优胜者”。当给出的一组输入数据选中一个“优胜者”时，判断其匹配度与设定误差控制线间的关系。如果该匹配度值小于误差控制线，网络就反复调整权值，将输入数据的特征加到权值中去，实现网络共振。

2 用人工神经网络优选钻头的方法

利用自适应共振神经网络优选钻头时，将影响钻头使用指标的主要因素作为神经元，把定性、定量方法结合在一起，形成一种综合性选型方法。该神经网络共选用 12 个神经元，包括地区、井深、可钻性系数、研磨性系数、机械钻速、钻头进尺、钻压、转速、井底水功率、井底压差、钻头牙齿磨损、钻头轴承磨损。各层神经元内部不存在权值矩阵，是相互独立的。只有输入层与输出层神经元之间存在权值矩阵，该矩阵反映了输入层神经元对钻头优选的影响。

神经网络法的运算，包括从输入层到输出层的运算、在输出层中的运算、从输出层反馈回到输入层 3 个步骤。

（1）选择底层神经元，并输入数据。在应用神经网络优选钻头时，选取的底层神经元中应包括影响钻头使用效果的各个因素和钻头的效益指标（包括钻头的使用效果及使用条件）。通过分析，综合得出最主要的地层因素，包括地区、可钻性系数和研磨性系数；钻头使用效果，包括机械钻速、钻头磨损（含牙齿磨损及轴承磨损）和钻头进尺；钻头使用条

件, 包括钻压、转速、井底压差、井底水功率和井深。

(2) 统计井深、可钻性系数、钻压、转速等底层神经元数据, 取各项的平均值作为该段地层内的特征数据。

(3) 计算各组输入层神经元数据与各种钻头所代表的输出神经元之间的匹配度。如果该组输入数据与某种钻头对应的输出神经元值相近, 即匹配度小于设定的误差控制线, 就将该组输入数据的特征以权值的形式加入到网络中去, 并把该输出神经元所对应的钻头类型定为在该种地层条件及使用条件下推荐采用的钻头类型。如果该组输入数据与所有输出神经元的匹配值均大于设定的误差控制线, 则网络将该组输入数据划分为一种新型钻头, 并在输出层中建立一个新的输出神经元与之相对应, 从而实现网络中钻头类型的不断扩大。

自适应共振人工神经网络的基本操作如下。

(1) 初始化权值:

$$T_{ij}(0) = 1, B_{ij}(0) = 1/(n+1) \quad (0 \leq i \leq n-1, 0 \leq j \leq m-1) \quad (1)$$

式中 T_{ij} ——从网络顶层钻头类型输出神经元到网络底层地区、井深等输入神经元的连接权值;

B_{ij} ——从底层输入到顶层输出的连接权值;

n ——底层神经元个数;

m ——顶层神经元个数;

ρ ——误差控制线, $0 \leq \rho \leq 1$ 。

(2) 输入底层神经元数据到数组 X 中, 即将地区、井深、可钻性系数、研磨性系数、进尺、钻速、牙齿磨损、轴承磨损、钻压、转速、井底压差、井底水功率等数据赋予数组 X 。

(3) 用下式计算第 2 步中输入的各组底层神经元数据与顶层神经元的匹配度:

$$\mu_j = \sum_i B_{ij} X_i \quad 0 \leq j \leq m-1 \quad (2)$$

式中 X_i ——数组 X 中的第 i 项。

(4) 选择一最佳匹配输出神经元。

(5) 用下列公式进行误差控制线检验。

$$\|X\| = \sum_i X_i, \|TX\| = \sum_i T_{ij} X_i, \|TX\| / \|X\| > \rho \quad (3)$$

式中 $\|X\|$ ——矩阵 X 的范数;

$\|TX\|$ ——矩阵 TX 的范数。

由式 (3) 判断后再转向第 (6) 步或第 (7) 步。

(6) 重新分类。把最佳钻头类型暂置为 0, 不参加比较, 转向第 (3) 步。

(7) 调整网络权值:

$$T_{ij}^*(t+1) = T_{ij}^*(t) X_i, B_{ij}^*(t+1) = \frac{T_{ij}^*(t) X_i}{0.5 + \sum_i T_{ij}^*(t) X_i} \quad (4)$$

(8) 去掉第 (6) 步中的节点限制, 转向第 (2) 步, 当计算完输入数据与所输出神经元的匹配程度时, 结束。

3 大庆深井钻头优选数据库的建立

根据人工神经网络优选钻头方法的要求，为了使优选的钻头更可靠，必须建立钻头使用数据库。为此，统计了1995年以来，三肇、宋芳屯、升平、尚家、昌德、朝阳沟和汪家屯的7个区块、27口深井、567口钻头使用情况的原始数据。包括钻头型号、钻头尺寸、使用层段、钻头进尺、纯钻进时间、机械钻速、钻具组合、地层孔隙压力、岩性、牙齿磨损、轴承磨损及钻压、转速、排量、泵压、钻井液密度、粘度、钻头水眼组合等钻井参数共18个数据。将不同钻头在每个区块、某个层位的使用情况分类进行了归类整理。同时，针对侏罗系高硬度、强研磨性和高温地层钻头使用效果不好，以及4000m以下地层资料少或空白的实际情况，为了建立完整的数据库，开展了新型钻头试验，并将试验结果一起输进数据库。表1列出了大庆地区深井钻井使用的样本数据库中部分数据。

表 1 样本数据库部分数据

井深 (m)	声波 时差	可钻性 系数 (10 ⁻⁴)	研磨性 系数 (10 ⁻³)	钻速 (m/h)	牙齿 磨损 级别	轴承 磨损 级别	进尺 (m)	钻时 (h)	钻压 (kN)	转速 (r/s)	排量 (L/s)	密度 (g/cm ³)	钻头 类型
2183	77.6	4.88	2.116	7.37	1	1	180.48	24.5	220	60	32	1.1	J ₂₂
2313	73.3	5.51	2.381	5.01	1	1	129.82	25.92	220	60	32	1.13	J ₂₂
2525	72.1	5.50	2.561	3.62	1	1	211.66	58.5	220	60	32	1.17	ATJ ₂₂
2741	71.5	2.36	3.187	3.16	1	3	216.23	68.5	220	60	32	1.17	J ₃₃
3297	66.8	2.70	2.817	2.79	1	2	187.07	67	220	65	28	1.15	ATJ ₃₃
2861	68.3	2.56	2.970	2.08	3	1	111.22	53.5	140	60	32	1.17	ATJ ₃₃
3485	63.0	2.63	3.653	1.45	2	1	47.11	32.5	240	65	28	1.16	ATJ ₃₃
3714	68.0	3.30	4.665	2.63	1	3	213.8	81.17	220	65	28	1.15	ATJ ₃₃
3812	65.0	2.92	3.959	1.40	1	1	90.36	64.67	120	65	28	1.17	ATJ ₄₄
3886	60.0	1.63	4.730	1.36	1	1	62.37	45.92	120	65	28	1.15	ATJ ₄₄

4 大庆深井钻头类型优选结果及现场实验

调用了数据库中各地区不同层位下各种钻头的使用状况数据，用神经网络方法评选钻头的优劣，分别优选了大庆宋芳屯地区、升平地区、宋站地区、三肇地区和尚家地区的钻头优先使用序列。表2列出了宋芳屯地区的推荐钻头序列。

表 2 宋芳屯地区的推荐钻头序列

层 位	井深 (m)	可钻性系数 (10 ⁻⁴)	研磨性系数 (10 ⁻³)	钻头从优到劣
泉二段	2400~2800	3.5~6.5	2.1~2.4	J ₃₃ , ATM ₂₂ , ATJ ₂₂
泉一段	2700~2900	2.2~4.5	2.2~2.6	ATJ ₃₃ , J ₃₃ , ATJ ₂₂
登四段、登三段	2850~3150	1.5~3.5	2.6~2.9	HJ517LG, J ₃₃ , ATJ ₃₃ , ATJ ₂₂
登二段	3150~3300	1.5~3.0	2.8~3.1	HJ537LG, ATJ ₃₃ , J ₃₃ , ATJ ₅₅
登一段	3300~3500	1.5~3.0	2.8~3.5	HJ537LG, ATJ ₃₃ , J ₃₃ , ATJ ₅₅

续表

层位	井深 (m)	可钻性系数 (10^{-4})	研磨性系数 (10^{-3})	钻头从优到劣
侏罗系	3300 ~ 3700			HJ537LG, ATJ ₃₃ , ATJ ₅₅
侏罗系	3700 ~ 4000	0.8 ~ 3.5	3.9 ~ 4.6	HJT617GDG
侏罗系	>4000			ATJ ₅₅ , ATJ ₃₃ , ATJ ₄₄

根据人工神经网络方法优选钻头的结果, 对大庆两口深井进行了现场试验。在现场实际应用中, 采用的钻井参数和优选的钻井参数基本一致, 选用的钻头类型与优选出的钻头类型一致。共进行了深部 6 个层段和 6 只钻头的钻井速度检验, 结果见表 3。

表 3 机械钻速预测结果与实钻结果比较

层位	林深 2 井					肇深 8 井				
	优选钻头	实际钻头	预测钻速 (m/h)	实际钻速 (m/h)	相对误差 (%)	优选钻头	实际钻头	预测钻速 (m/h)	实际钻速 (m/h)	相对误差 (%)
泉二段	HA517LG	HA517LG	1.53	1.68	8.93	HJ517LG	HJ517LG	2.78	3.21	13.41
登四段	HJ517LG	HJ517LG	2.64	2.92	10.62	HJ517LG	HJ517LG	2.27	2.69	15.61
登二段	HJ517LG	HJ517LG	2.09	2.31	9.52	HJ537G	HJ537LG	2.24	2.16	3.70
侏罗系	HJ537LG	HJ537LG	2.57	2.82	8.86	HJ617GDG	HJ617GDG	2.55	2.83	9.90
侏罗系	HJ537GDG	HJ537GDG	2.25	2.49	9.64	HJ617GDG	HJ617GDG	2.21	2.48	10.89
基底	HJ537GDG	HJ537GDG	2.61	2.92	10.62	HJ617GDG	HJ617GDG	1.53	1.71	10.53

由表 3 看出, 利用人工神经网络法预测的机械钻速, 其相对误差基本在 10% 以内。对两口井的机械钻速变化情况分析结果表明: 林深 2 井井深为 3440m, 深部井段纯进尺 1123.32m, 纯钻进时间 413.28h, 深部井段平均机械钻速 2.7m/h; 肇深 8 井井深 3450m, 深部井段纯进尺 1076m, 纯钻进时间 439.2h, 深部井段平均机械钻速 2.45m/h。两口验证井深部井段平均进尺 1099.7m, 平均机械钻速 2.58m/h, 平均单只钻头用量 9 只, 平均单只钻头进尺 122.2m, 比 1997 年 9 口深井的深部平均机械钻速 (2.14m/h) 高 20.5%, 比平均行程钻速 (1.55m/h) 高 21.2%; 比 1997 年深井的单只钻头平均进尺 (61.69m) 高 98.1%。两口验证井在深部井段的各种钻速指标都在 1997 年基础上提高了 20% 以上。

5 结 论

(1) 根据深井岩石的特点, 优选正确的钻头类型是提高大庆油田深井钻井速度的关键。

(2) 本文建立的人工神经网络优选钻头方法, 是将定量方法和定性方法相结合, 使钻头优选结果更加可靠, 克服了以往钻头优选方法缺乏定量的缺陷。

(3) 根据大庆深部地层的特点, 建立了大庆地区钻头使用的数据库, 应用人工神经网络法对大庆油田深井使用钻头进行了优选, 对大庆 2 口深井的现场实验表明, 钻井速度提高 20% 以上。

该论文与阎铁、刘春天、毕雪亮合作完成, 发表在《石油学报》2002 年第 4 期, 排名第四。

钻头优选的属性层次模型及应用

摘要：在属性测度的基础上，通过分析判断准则和属性判断矩阵，建立属性层次模型。该模型将属性识别理论和层次分析方法结合在一起，是一种新的无结构决策方法。将该方法应用于钻头优选技术中，研究了属性层次模型进行钻头优选的步骤和层次结构。结合大庆油田深井的钻井实际情况，基于该油田深井钻头使用数据库，利用所建立的模型对大庆油田的深井钻头进行了优选，以尚志地区为例进行了实际分析，给出了该地区钻头优选方案。

关键词：属性 层次分析 识别 判断矩阵 优选（优化） 钻井

钻头优选是优化钻井的重要内容。钻头费用在一口井的总投资里所占的比例一般不大，但钻头的使用效果会直接影响整个钻井进度和可靠性。合理的使用钻头，可以大幅度地降低钻井成本。因此就需要对钻头进行优选技术的研究。

本文将属性层次方法应用于钻头优选中，在属性测度的基础上，应用层次分析方法，研究了钻头描述的度量问题，讨论不同描述之间的关系及相应的度量之间的关系。

属性识别理论模型 AHM (Attribute Hierarchical Model) 与一般的解决方法相比，是一种新的无结构决策方法。该模型在属性测度空间和有序分隔类的基础上，依据属性识别的准则，建立属性识别模型。

本文建立的钻头优选方法考虑钻头进尺、钻头寿命、平均机械钻速和单位进尺钻头成本（钻头单价/钻头进尺）4 个方面（可增减影响因素），根据钻头记录，按层位为新井选择钻头类型。大庆油田根据深井深层机械钻速慢、钻头数量消耗大的实际情况，需要进行系统的评价和分析。现场的应用表明了该方法的合理性。

1 AHM 法的基本概念

以上讨论了属性识别方法的基本思路，下面研究该方法的有关基本理论和依据，进而建立相应的评价模型。

1.1 属性测度

设 B 为某区块所有使用过的钻头的全体，称为对象空间。设 C 为 B 中元素的某类属性，称为属性空间。例如钻头进尺 C_1 、钻头寿命 C_2 等都可以作为属性空间。属性空间的任意情况都称为属性集。属性空间 C 按优劣可分为若干情况。

设 b 是 B 中的一个元素， A 为一个属性集，用“ $b \in A$ ”表示“ b 具有属性 A ”。“ $b \in A$ ”仅是一种定性的描述，而更需要的是定量地刻画“ b 具有属性 A ”的程度。用一个数来表示“ $b \in A$ ”的程度，这个数记为 $B(b \in A)$ 或 $B_b(A)$ ，称它为 $b \in A$ 的属性测度。为方便起见，要求属性测度在 $[0, 1]$ 之内取值，属性测度满足一定的规则。

1.2 准则

使用层次决策方法来评判元素的重要性，在层次决策中，其中每层的一个元素都可视为其下一层元素的准则。例如在评判钻头 b_i 和 b_j 时，钻头进尺 C_1 、钻头寿命 C_2 、平均机械钻