doi:10.11911/syztjs.2024094

引用格式： 王果，许博越. 理论模型与机器学习融合的 PDC 钻头钻速预测方法 [J]. 石油钻探技术，2024，52（5）：117−123.
WANG Guo, XU Boyue. The method to predict ROP of PDC bits based on fusion of theoretical model and machine learning [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(5): 117−123.

理论模型与机器学习融合的 PDC 钻头钻速预测方法

王 果，许博越

（中石化石油工程技术研究院有限公司，北京 102206）

摘 要： 为了提高 PDC 钻头机械钻速的预测精度，为现场工程人员指导钻井生产提供依据，基于 Teale 模型，综合考虑井下螺杆钻具、水力破岩、旋转冲击钻具破岩能量参数，引入 PDC 门限钻压和门限扭矩，修正钻压与扭矩的计算方法，建立复合比能机械钻速理论方程；基于钻速比概念，建立了理论与数据深度融合的机械钻速预测模型。验证结果表明，该模型既保证了理论方向的正确，又综合利用了数据驱动学习的优点，提高了 PDC 钻头的机械钻速预测精度。通过顺北实钻井数据验证该融合方法的预测精度，结合实例优化分析可大幅提高机械钻速。该方法可为优化钻井参数和评价钻头破岩效果、优选提速工具提供有效的量化工具，具有重要的推广应用价值。

关键词： 机械钻速；破岩能量；门限扭矩；复合比能；机器学习；理论数据融合

中图分类号： TE242　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1001–0890（2024）05–0117–07

The Method to Predict ROP of PDC Bits Based on Fusion of Theoretical Model and Machine Learning

WANG Guo, XU Boyue

(*Sinopec Research Institute of Petroeum Engineering Co., Ltd., Beijing,* 102206*, China*)

Abstract: In order to improve the prediction accuracy of the rate of penetration (ROP) of polycrystalline diamond compact (PDC) bits and provide a basis for field engineers to guide drilling production, the energy parameters of downhole screw drilling tools, hydraulic rock breaking, and rotary impact drilling tools were comprehensively considered based on the Teale model. In addition, the concepts of PDC threshold weight on bit (WOB) and threshold torque were introduced, and the calculation methods of WOB and torque were corrected. The theoretical equation of ROP of composite specific energy was established. Based on the concept of ROP ratio, a prediction model of ROP based on deep fusion of theory and data was established. The results show that the model not only points out the correct theoretical direction but also comprehensively utilizes the advantages of data-driven learning, and it further improves the prediction accuracy of ROP of PDC bits. The prediction accuracy of the fusion method was verified by the actual drilling data in Shunbei, and the ROP can be greatly improved by the optimization analysis of the example. This method can provide an effective quantitative tool for optimizing drilling parameters, evaluating rock breaking effect of drill bits, and upgrading speed-up tools, which has important application value.

Key words: ROP; rock breaking energy; threshold torque; compound specific energy; machine learning; fusion of theory and data

随着油气勘探开发向深层发展，深层、超深层储层岩石硬度大、研磨性强、可钻性差，导致钻头机械钻速低、钻井周期长、钻井成本居高不下。近年来，PDC 钻头占钻头应用总数的 80% 左右，其钻速模型研究是提高 PDC 钻头钻井效率和降低钻井成本的理论基础。但与此同时，钻井参数优化研究仍

收稿日期： 2024-04-14；**改回日期：** 2024-09-18。

作者简介： 王果（1981—），男，河南邓州人，2004 年毕业于武汉理工大学电子信息工程专业，2010 年获中国石油大学（北京）油气井工程专业博士学位，研究员，主要从事智能钻井、钻井信息处理与控制等方向的研究与管理。E-mail: wangguo.sripe@sinopec.com。

基金项目： 国家重点研发计划项目“井筒稳定性闭环响应机制和智能调控方法”（编号：2019YFA0708303）和中石化科技部攻关项目“钻井数字化模拟仿真关键技术研究”（编号：P21065-3）联合资助。

停留在半经验公式阶段，针对 PDC 钻头复合钻井尚未形成一套成熟的钻速方程，制约了钻井工程优化、钻井参数优选、提速工具优选、机械钻速及钻井周期预测等，很多提速技术应用缺少科学理论依据，限制了钻井提速技术的发展。

现有机械钻速预测方法主要有经验法、物理模型法和数据驱动法。经验法是基于钻井工程师对作业区工况的经验积累，缺乏理论指导且无法适用于其他区域；物理模型法主要通过建立机械钻速与主要影响因素的数学表达式预测机械钻速[1−4]，但传统物理模型无法适用于 PDC 钻头、动力钻具等新工具和新工艺；数据驱动法是基于人工智能方法预测机械钻速[5−8]，数据驱动机器学习方法是在“黑箱”中运行，可解释性差，且对数据量的依赖程度高。近年来，国内外学者采用不同算法构建理论模型，提高了预测的可信度和准确率[9−12]，但现有理论模型较少考虑水力破岩、冲击破岩、门限钻压与门限扭矩的影响，在决策中仅实现了数据的单一决策。

针对上述问题，笔者基于机械比能破岩理论，综合考虑井下螺杆钻具、水力破岩、冲击功等破岩能量输入，融入 PDC 钻头门限钻压和门限扭矩方程，提出了 PDC 复合钻井综合钻速预测方法，建立了理论与数据驱动深度融合的综合机械钻速预测模型，利用机器学习方法训练钻速比进行模型修正，综合利用数据驱动学习的优点，提高机械钻速的预测精度；利用顺北地区实钻数据验证了预测机械钻速的精度，并深入讨论了模型的应用与分析流程，提出了提高钻速的钻井参数优化建议。

1　PDC 钻头复合钻井钻速理论方程

1.1　破岩能量平衡基本原理

钻头破岩过程是一个能量平衡过程，当钻头有效输出功大于岩石体积破碎所需最小能量时，岩石破碎。破碎岩石所需的最小能量取决于岩石的强度，有效输出功取决于系统输入功及能量的传递效率。机械比能为钻头破碎单位体积岩石所做的功，将输入功整合为一个参数。F. E. Dupriest 等人[13−14]在 Teale 模型的基础上考虑钻井效率的影响，增加了能量有效利用率。大量试验数据说明，理想情况下机械比能与岩石抗压强度非常接近，因此可利用岩石抗压强度作为参照对比分析实际机械比能水平，从而确定钻井效率。已知机械比能、岩石抗压强度及其他相关钻进参数，可以反推机械钻速。

1.2　复合钻井钻速理论方程

机械比能是描述钻井效率和协助跟踪破碎单位体积岩石所需能量的重要参数，可用于优化钻井参数和优选钻头。Teale 机械比能模型的标准形式为[15]：

$$E_{\mathrm{MHF}}=\frac{4p}{\pi D_{\mathrm{b}}^2}+\frac{8vT}{D_{\mathrm{b}}^2 n} \tag{1}$$

式中：E_{MHF} 为机械比能，MPa；p 为钻压，kN；D_{b} 为钻头直径，mm；n 为转速，r/min；T 为扭矩，kN·m；v 为机械钻速，m/h。

Teale 机械比能模型简单、参数少、便于使用，但未考虑门限钻压和门限扭矩，同时忽略了水力破岩、螺杆、冲击器等提速工具的影响。为此，融入 PDC 钻头的门限钻压和门限扭矩，并增加螺杆能量、水力破岩能量和冲击器的冲击功等。

1.2.1　水力参数的影响

实际钻井过程中，钻头水力参数不仅能起到清洁井底岩屑、避免重复破碎岩屑的作用，而且在钻进岩石强度较低的地层过程中，当射流冲击力超过地层岩石破碎强度时，射流将直接破碎岩石，从而起到辅助破岩的作用。因此，需要将机械能量与水力能量二者有机结合起来，形成井底真实钻井条件下的破岩比能理论模型[16]。考虑钻头钻压、扭矩和水力能量对破岩效果的综合影响，破岩比能的表达式为：

$$E_{\mathrm{MHF}}=\frac{4p}{\pi D_{\mathrm{b}}^2}+\frac{8vT}{D_{\mathrm{b}}^2 n}+\frac{4\eta\Delta p_{\mathrm{b}}Q}{\pi D_{\mathrm{b}}^2 n} \tag{2}$$

式中：η 为水功率效率；Q 为排量，$\mathrm{m^3/h}$；Δp_{b} 为钻头压降，MPa。

1.2.2　螺杆钻具的影响

复合钻井是指在井下钻具组合中加入井下动力钻具，将钻井液循环时的水力能量转换为钻头的机械能，从而破岩，其转速可以通过调整钻井液的排量在一定范围内调整[17−19]。复合钻进过程中，钻头的驱动由地面驱动（转盘或顶驱）和地下驱动（一般为螺杆钻具）组成，其中地下驱动作为钻头的主要动力。

复合钻井条件下的破岩比能模型为：

$$E_{\mathrm{MHF}}=\frac{4p}{\pi D_{\mathrm{b}}^2}+\frac{4(v_{\mathrm{SF}}+K_{\mathrm{N}}Q)(2\pi T_{\mathrm{SF}}+q_{\mathrm{PDM}}\Delta p_{\mathrm{PDM}})}{\pi D_{\mathrm{b}}^2 n}+\frac{4\eta\Delta p_{\mathrm{b}}Q}{\pi D_{\mathrm{b}}^2 n} \tag{3}$$

式中：v_{SF} 为地面转速（转盘转速），r/min；K_N 为螺杆钻具的转速流量比，r/L；T_{SF} 为地面扭矩（转盘扭矩），kN·m；q_{PDM} 为螺杆每转排量，L/r；Δp_{PDM} 为螺杆压降，MPa。

1.2.3　冲击工具的影响

冲击器安装在钻头和钻铤之间，当工具下入井底并施加钻压时，冲击器开始工作，钻井液经射流元件交替作用到活塞上、下端面，推动活塞带动冲锤产生高频往复运动[20]。冲锤高频冲击作用在砧子上，冲击能量由传递机构传递到钻头，使钻头在旋转的同时受到冲击作用，实现旋冲破岩，进而提高机械钻速[21−23]。复合冲击条件下的破岩比能模型为：

$$E_{MHF}=\frac{4p}{\pi D_b^2}+\frac{4(v_{SF}+K_NQ)(2\pi T_{SF}+q_{PDM}\Delta p_{PDM})}{\pi D_b^2 n}+\frac{4\eta\Delta p_b Q}{\pi D_b^2 n}+\frac{2m_{FT}v_{FT}^2}{\pi D_b^2 n} \tag{4}$$

式中：m_{FT} 为冲击质量，kg；v_{FT} 为冲击速度，m/s。

1.2.4　门限钻压和门限扭矩影响

旋转钻井模式下，PDC 钻头同时满足门限钻压与门限扭矩的双重条件，是持续高效破岩的基础。PDC 钻头的门限钻压沿用与牙轮钻头门限钻压相同的定义方式[24]。因为公式中的各参数并不涉及 PDC 钻头与牙轮钻头切削方式与切削齿结构特征，所以也可以用牙轮钻头门限钻压的计算公式计算 PDC 钻头的门限钻压。PDC 钻头破岩所需的门限扭矩是指钻头不稳定运动被有效抑制时钻头高效破岩所需的最小扭矩，数值上等于最大合理切削深度下钻头破岩扭矩波动曲线在特定周期内的最小峰值。影响 PDC 钻头门限扭矩的最主要因素分别是地层抗压强度和钻头尺寸与临界切削深度。将 PDC 钻头的门限钻压和门限扭矩引入破岩比能方程，得到新的综合破岩比能方程：

$$E_{MHF}=\frac{4(p-W_{bs})}{\pi D_b^2}+\frac{4\left(v_{SF}+K_NQ\right)(2\pi T_{SF}+q_{PDM}\Delta p_{PDM}-T_{bs})}{\pi D_b^2 n}+\frac{4\eta\Delta p_b Q}{\pi D_b^2 n}+\frac{2m_{FT}v_{FT}^2}{\pi D_b^2 n} \tag{5}$$

式中：W_{bs} 为门限钻压，kN；T_{bs} 为门限扭矩，kN·m。

在钻井过程中钻头传递机械能量的效率为[16]：

$$E_{FFM}=\frac{E_{MHF(min)}}{E_{MHF}} \tag{6}$$

式中：E_{FFM} 为能量效率；$E_{MHF(min)}$ 为最小机械比能，MPa。

钻井过程中破岩机械比能的最小值通常等于围压下的岩石抗压强度：

$$E_{MHF(min)}=S_{cc} \tag{7}$$

式中：S_{cc} 为围压下的抗压强度，MPa。

综合式（5）—（7），机械钻速预测模型可表示为：

$$n=\frac{4(v_{SF}+K_NQ)(2\pi T_{SF}+q_{PDM}\Delta p_{PDM}-T_{bs})+4\eta\Delta p_b Q+2m_{FT}v_{FT}^2}{\pi D_b^2\left(\dfrac{S_{cc}}{E_{FFM}}-\dfrac{4(p-W_{bs})}{\pi D_b^2}\right)} \tag{8}$$

1.3　理论方程关键参数求解

1.3.1　岩石单轴抗压强度

常用岩石单轴抗压强度（S_{uc}）的计算模型是 Deer 和 Miller 根据大量的室内试验结果建立的砂泥岩单轴抗压强度的关系式[23]。

$$\begin{cases} S_{uc}=E_d[0.008V_{sh}+0.0045(1-V_{sh})] \\ E_d=\dfrac{\rho v_s^2\left(3v_p^2-4v_s^2\right)}{v_p^2-2v_s^2} \end{cases} \tag{9}$$

式中：S_{uc} 为单轴抗压强度，MPa；V_{sh} 为泥质含量；v_p 为纵波波速，km/s；v_s 为横波波速，km/s。

为使单轴抗压强度计算公式具有一定的普适性，根据摩尔库伦破坏准则，单轴抗压强度与黏聚力存在以下关系：

$$S_{uc}=\frac{2\cos\theta}{1-\sin\theta}S_o \tag{10}$$

式中：S_o 为黏聚力，MPa；θ 为内摩擦角，（°）。

1.3.2　岩石的三轴抗压强度

目前国内外广泛采用和认可的 S_{cc} 计算模型为：

$$S_{cc}=\begin{cases} S_{uc}+p_e+2p_e\dfrac{\sin\theta}{1-\sin\theta} & （过平衡） \\ \dfrac{2}{3}S_{uc}\exp(-0.003\,323\,7p_e)+\dfrac{1}{3}S_{uc} & （欠平衡） \end{cases} \tag{11}$$

其中

$$p_e=p_{ECD}-p_p \tag{12}$$

式中：p_p 为地层孔隙压力，MPa；p_{ECD} 为循环当量密度压力，MPa。

1.3.3　破岩能量效率

钻头破岩效率与井底岩石围压、钻井液密度的关系模型为[25]：

$$E_{FFM}=(0.024\,7S_{cc}+11.319)(2.15\ln\rho+3.283\,6) \tag{13}$$

式中：ρ 为岩石密度，g/cm^3。

具体的破岩能量效率依据井深、井型、钻头类型和钻具组合的不同而不同，可以根据试钻或室内测试的方法获得特定钻头的破岩能量效率 $E_{FM\text{-}M}$：1）选择某种典型岩性，恒定岩石强度 S_{cc}，确定钻井参数，利用试钻法改变钻井参数组合，得到一定 S_{cc} 条件下的最大和最小机械钻速；2）根据所建立机械比能模型，得到最大和最小机械比能，并计算对应破岩能量效率；3）改变 S_{cc}，重复上述步骤，得到不同 S_{cc} 与 E_{FF} 最大值和最小值的散点；4）对 S_{cc} 与 E_{FF} 最大值和最小值的散点图分别进行数据回归并求取平均值，即得到该试验钻头 S_{cc} 与 $E_{FM\text{-}M}$ 的关系式；5）改变钻头型号，重复以上步骤，得到不同钻头的 S_{cc} 与 $E_{FM\text{-}M}$ 的关系式。

1.4　理论钻速模型验证分析

顺北 5−4H 井采用不同机械比能模型预测机械钻速的结果如图 1 所示，其中 Dupriest 比能模型预测的钻速精度为 60%，且预测值比实测值整体偏低，这是因为其输入功只考虑了转盘/顶驱的输入功，且假定钻头破岩效率为固定范围。优化的 Teale 比能模型引入了 O. Oloruntobi 等人[26] 的模型，增加了井下动力钻具等参数，预测精度较 Dupriest 模型有所提高，能够预测机械钻速突然变化的趋势，但与实测值相比仍然有较大偏差。复合比能钻速模型综合考虑水力、螺杆、冲击、门限值等破岩能量，可满足实际钻井工具及工况条件，机械钻速预测精度提升至 81%。

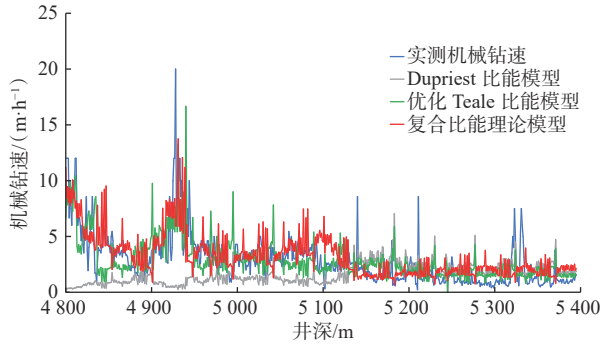

图 1　顺北 5−4H 井不同机械比能模型机械钻速的对比

Fig.1　ROP comparison of different specific energy models in Well Shunbei 5−4H

测试结果表明，岩石抗压强度、钻压、转速、钻井液密度对理论模型钻速影响较大，其中岩石抗压强度的不确定性很高。该井不同岩石抗压强度下的机械钻速如图 2 所示。由图 2 可以看出，在其他参数不变的条件下，不同的岩石抗压强度会使机械钻速预测值成倍的变化。这些参数受实钻条件影响，难以准确获取，从而影响机械钻速的预测，因此需要借助大数据的统计分析优势，研究理论方法与机器学习的深度融合方法，以进一步提高钻速模型的预测精度。

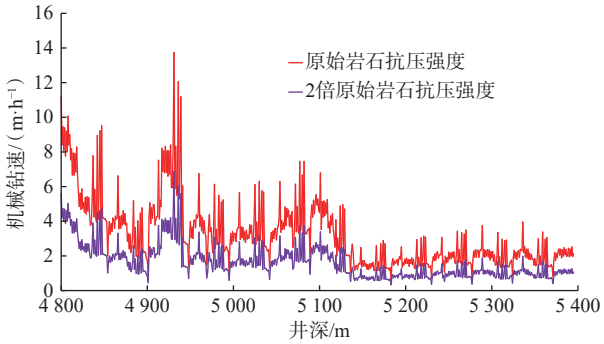

图 2　顺北 5−4H 井不同岩石抗压强度下的机械钻速

Fig.2　ROP comparison of different rock compressive strengths in Well Shunbei 5−4H

2　理论与数据融合钻速预测模型

2.1　数据驱动的机器学习方法

机器学习方法利用数据训练模型并进行预测，可用于分类、回归、聚类和降维等任务。Bagging 算法和随机森林算法对提高预测精度有显著效果，但随机森林算法预测参数众多的钻速时存在过拟合问题。因此，选用算法原理与梯度增强决策树类似的 XGBoost 算法，不断进行特征分裂以生长一棵树，每一轮树的学习，通过拟合上一轮模型的预测值与实际值之间的残差来完成。当训练完成得到 k 棵树时，需要预测的样本分数，在每棵树中会落到对应的一个叶子节点，每个叶子节点就对应一个分数，最后将每棵树对应的分数加起来就是该样本的预测值。

2.2　数据融入理论综合预测方法

钻井过程是一个实时动态过程，不确定性、模糊性、随机干扰等都是潜在问题。影响钻速的因素众多，包括钻井参数、水力参数、钻井液性质、地层性质、岩石特性、钻具组合和钻头磨损度等。理论模型存在细节反映能力弱、部分参数无法准确获取等问题，机器学习方法存在依赖大量数据、外推能力弱和可解释性差等问题。采用理论与数据深度融合的方式，有助于弥补 2 种方法的劣势，进一步提高钻速预测精度和模型适用性。

为此，首先引入钻速比的概念，假设实测机械钻速为 y_1，理论机械钻速为 y_2，两者之比为钻速比

$y' = y_1/y_2$；其意义在于把影响理论钻速和实测钻速差异的众多因素合并成一个值来表示，y'越接近 1，表示理论钻速和实测钻速越接近；然后利用 XGBoost 算法来训练$y' = y_1/y_2$，让模型来找到实测机械钻速和理论机械钻速之间的差异，再通过钻速比值修正理论模型，从而得到理论与机器学习深度融合的机械钻速。理论与数据深度融合钻速综合预测方法的原理如图 3 所示。

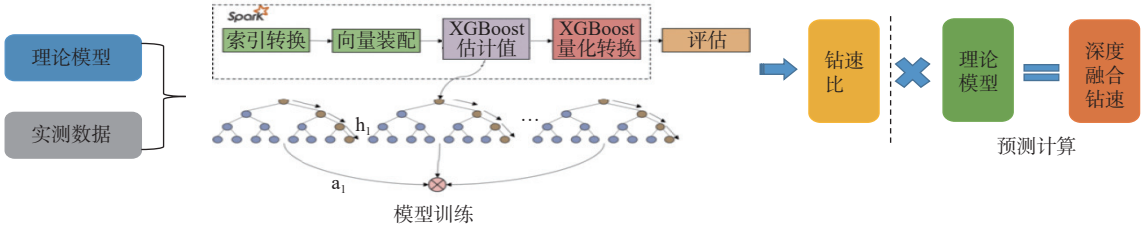

图 3　数据与理论融合的机械钻速综合预测方法

Fig.3　ROP prediction method integrating data and theory

数据与理论模型深度融合钻速综合预测模型的计算流程如图 4 所示。利用井口和井下测录井传感器采集原始信息，将所需参数存入训练集数据库中；先利用计算机读取并进行数据预处理，以满足机器学习模型的训练需求；随后设计机器学习模型并进行 XGBoost 模型训练；当训练精度满足要求时，即可获得有效钻速比预测模型；采用复合比能钻速模型进行机械钻速预测，得到理论钻速；根据钻速比修正理论预测钻速，得到深度融合钻速预测；进行钻井参数优化分析、工具优选及参数的优调。

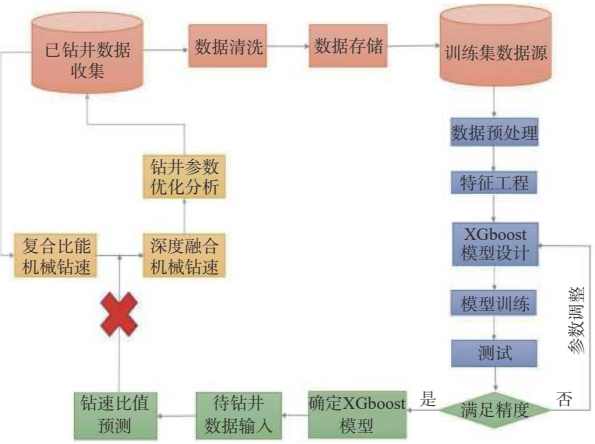

图 4　深度融合机械钻速预测方法的计算流程

Fig.4　Calculation flowchart of ROP prediction method with deep fusion

2.3　理论与数据融合模型的验证

收集顺北油田 20 多口井实测数据，采用 XGBoost 算法进行钻速比预测训练，并以顺北 5 号断裂单井为测试集，先采用复合比能的理论方程进行钻速预测计算，然后使用训练的钻速比进行计算修正，共进行了 6 口井的验证计算，平均机械钻速预测精度达到 92%，钻速预测精度进一步得到提高。以顺北 5−4H 井为例，该井深度融合钻速预测结果如图 5 所示，可以看出，深度融合模型的机械钻速预测精确度可达 92%。深度融合模型的预测不但整体趋势符合较好，且机械钻速预测值与实测值的符合度有较大提升，说明融合模型能够体现了 2 种方式的优点。

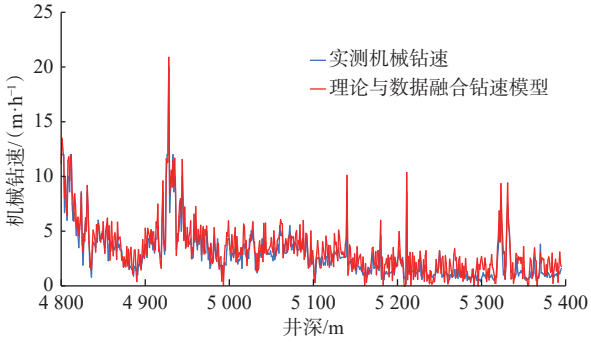

图 5　顺北 5−4H 井预测机械钻速与实测结果对比

Fig.5　Comparison of ROP predicted and measured results of Well Shunbei 5−4H

3　现场实例分析

3.1　顺北 5−12H 井概况

顺北 5−12H 井设计完钻井深 8 321.88 m。该井采用四开井身结构，二开井段（1 200～5 340 m）使用混合 PDC 钻头进行旋转钻进，平均钻压 120 kN，转速 50 r/min，排量 36 L/s。4 700～5 300 m 井段岩石抗压强度变化幅度较大，该井段二叠系英安岩、玄武岩的抗压强度较高，机械钻速偏低。

3.2　钻速预测模型的验证

分别采用比能模型和融合模型预测该井段的机械钻速（见图 6）。比能理论模型可以较准地预测机

械钻速变化趋势，但是仍存在一些不确定性；采用深度融合模型后，机械钻速预测精度大幅提高，通过机器学习的修正方法，增强了理论模型在岩性强度变化较大井段的适应性，精度足以满足现场应用及预测需求。

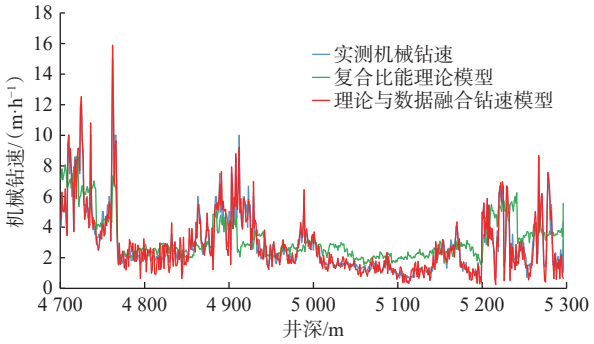

图 6　顺北 5−12H 井 4 700～5 300 m 井段的钻速预测结果

Fig.6　ROP prediction of Well Shunbei 5−12H (4 700～5 300 m)

3.3　钻井参数优化分析

针对该井段机械钻速较低及二叠系英安岩、玄武岩抗压强度高的特点，优选推荐后续井段使用“异形齿 PDC 钻头+旋冲螺杆+大尺寸钻具”提速。通过异形齿钻头提高火山岩硬地层破岩效率，配套旋冲螺杆增大井下输入能量，扩大钻压和转速的调配范围，采用大尺寸钻具可进一步降低钻井液密度，提高钻井循环排量，增强水力能量利用率，强化钻井参数，实现该井段提速。

结合“异形齿 PDC 钻头+旋冲螺杆+大尺寸钻具”，钻压由 220 kN 降至 120 k N，转速由 50 r/min 提高为 50 r/min+螺杆转速，钻井液密度由 1.25 kg/L 降至 1.20 kg/L，排量由 36L/s 提高至 45 L/s，钻井参数优化后的结果如图 7 所示。优化后该井段的平均机械钻速可以由 2.80 m/h 提高至 3.70 m/h，提高了 33.1%，提速效果明显。

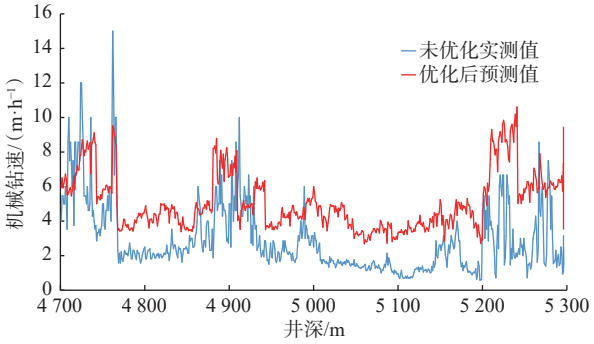

图 7　顺北 5−12H 井 4 700～5 300 m 井段钻速优化对比

Fig.7　Comparison of ROP optimization for Well Shunbei 5−12H(4 700～5 300 m)

4　结　论

1）PDC 复合钻井综合钻速预测方法综合考虑了井下螺杆钻具、水力破岩、冲击功等破岩能量输入，融入了 PDC 门限钻压和门限扭矩，解决了原有钻速方程不适用 PDC 钻头的问题。

2）引入钻速比的概念，应用机器学习方法训练钻速比，在 PDC 复合钻井综合钻速预测方法中对比修正钻速比，实现了理论模型与机器学习方法深度融合的机械钻速预测。

3）理论与数据融合机械钻速预测方法的预测精度能够满足现场应用及预测需求，但需要进一步验证基于该方法的钻速预测及参数优化在冲击破岩、气体钻井等特殊破岩方式下的应用效果。

参　考　文　献

References

[1] 杜镰，水运震，邢纪国，等. 钻井过程中的预测钻速的一种新方法[J]. 江汉石油学院学报，1995，17(3)：49–53.
DU Lian, SHUI Yunzhen, XING Jiguo, et al. A new method for predicting drilling velocities[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1995, 17(3): 49–53.

[2] WALKER B H, BLACK A D, KLAUBER W P, et al. Roller-bit penetration rate response as a function of rock properties and well depth[R]. SPE 15620, 1986.

[3] 郭永峰. 用回归分析法预测钻头最佳进尺及钻速 [J]. 石油钻采工艺，1994，16(1)：24–26.
GUO Yongfeng. Projection of bit optimum footage and penetration rate with regression analysis method[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1994, 16(1): 24–26.

[4] YOUNG F S, Jr. Computerized drilling control[J]. Journal of Petroleum Technology, 1969, 21(4): 483–496.

[5] HEGDE C, GRAY K. Evaluation of coupled machine learning models for drilling optimization[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 56: 397–407.

[6] 沙林秀，胥陈卓. 基于主成分分析的 NCPSO-BP 机械钻速预测[J]. 石油钻采工艺，2022，44(4)：515–521.
SHA Linxiu, XU Chenzhuo. Prediction of NCPSO-BP ROP based on principal component analysis[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(4): 515–521.

[7] 石祥超，王宇鸣，刘越豪，等. 关于人工智能方法用于钻井机械钻速预测的探讨 [J]. 石油钻采工艺，2022，44(1)：105–111.
SHI Xiangchao, WANG Yuming, LIU Yuehao, et al. Discussion on the application of artificial intelligence method to the prediction of drilling machinery ROP[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(1): 105–111.

[8] GAN Chao, CAO Weihua, WU Min, et al. Two-level intelligent modeling method for the rate of penetration in complex geological

drilling process[J]. Applied Soft Computing, 2019, 80: 592–602.

[9] 张海军, 张高峰, 王国娜, 等. 基于遗传算法优化随机森林模型的机械钻速分类预测方法 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(35): 15572–15578.
ZHANG Haijun, ZHANG Gaofeng, WANG Guona, et al. Classification and prediction method for ROP based on genetic algorithm optimization random forest model[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(35): 15572–15578.

[10] 张立刚, 苗振华, 黄小刚, 等. 基于 MEA-BP 神经网络的钻井机械钻速预测 [J]. 自动化与仪表, 2022, 37(11): 87–92.
ZHANG Ligang, MIAO Zhenhua, HUANG Xiaogang, et al. Prediction of drilling ROP based on MEA-BP neural network[J]. Automation & Instrumentation, 2022, 37(11): 87–92.

[11] 杨顺辉, 郭珍珍, 张洪宝, 等. 基于集成迁移学习的机械钻速预测 [J]. 计算机系统应用, 2022, 31(10): 270–278.
YANG Shunhui, GUO Zhenzhen, ZHANG Hongbao, et al. Rate of penetration prediction using ensemble transfer learning[J]. Computer Systems & Applications, 2022, 31(10): 270–278.

[12] 柳军, 严顾鑫, 郭晓强, 等. 基于灰色-加权马尔可夫的机械钻速动态预测 [J]. 系统科学与数学, 2022, 42(7): 1727–1739.
LIU Jun, YAN Guxin, GUO Xiaoqiang, et al. Dynamic prediction of drilling rate based on grey-weighted Markov[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2022, 42(7): 1727–1739.

[13] DUPRIEST F E, KOEDERITZ W L. Maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy[R]. SPE 92194, 2005.

[14] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965, 2(1): 57–73.

[15] DUPRIEST F E. Comprehensive drill-rate management process to maximize rate of penetration[R]. SPE 102210, 2006.

[16] 陈志学, 黎红胜, 于文华, 等. 虚拟强度指数优化钻井技术的发展与应用 [J]. 断块油气田, 2012, 19(2): 237–239.
CHEN Zhixue, LI Hongsheng, YU Wenhua, et al. Development and application of VSI optimal drilling technology[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19(2): 237–239.

[17] 曲思凝. 基于机械比能的地层物性和钻头效率随钻评价研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
QU Sining. Evaluation of formation properties and bit efficiency based on mechanical specific energy during drilling[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.

[18] 苏超, 李士斌, 王昶皓, 等. 修正机械比能模型的研究 [J]. 石油化工高等学校学报, 2018, 31(5): 71–76.
SU Chao, LI Shibin, WANG Changhao, et al. Research on modification of mechanical specific energy model[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2018, 31(5): 71–76.

[19] 崔猛, 李佳军, 纪国栋, 等. 基于机械比能理论的复合钻井参数优选方法 [J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 66–70.
CUI Meng, LI Jiajun, JI Guodong, et al. Optimize method of drilling parameter of compound drilling based on mechanical specific energy theory[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 66–70.

[20] 罗恒荣, 索忠伟, 谭勇, 等. 防托压冲击器在盘 40-斜 501 井的应用 [J]. 石油钻探技术, 2015, 43(5): 112–115.
LUO Hengrong, SUO Zhongwei, TAN Yong, et al. Application of reducing WOB stack impactor in Well Pan 40-Xie 501[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(5): 112–115.

[21] 李广国, 索忠伟, 王甲昌, 等. 射流冲击器配合 PDC 钻头在超深井中的应用 [J]. 石油机械, 2013, 41(4): 31–34.
LI Guangguo, SUO Zhongwei, WANG Jiachang, et al. Application of jet hammer and PDC bit in superdeep well[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(4): 31–34.

[22] 高德利, 刘维, 万绪新, 等. PDC 钻头钻井提速关键影响因素研究 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 20–34.
GAO Deli, LIU Wei, WAN Xuxin, et al. Study on key factors influencing the ROP improvement of PDC bits[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 20–34.

[23] 白彬珍, 曾义金, 芦鑫, 等. 钻头破岩能量与岩石自适应匹配提速技术 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 30–36.
BAI Binzhen, ZENG Yijin, LU Xin, et al. An ROP improvement technology based on adaptive matching between the rock-breaking energy of bits and rock features[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 30–36.

[24] 胡群爱, 孙连忠, 张进双, 等. 硬地层稳压稳扭钻井提速技术 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 107–112.
HU Qunai, SUN Lianzhong, ZHANG Jinshuang, et al. Technology for drilling speed increase using stable WOB/torque for hard formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 107–112.

[25] CAICEDO H U, CALHOUN W M, EWY R T. Unique ROP predictor using bit-specific coefficient of sliding friction and mechanical efficiency as a function of confined compressive strength impacts drilling performance[R]. SPE 92576, 2005.

[26] OLORUNTOBI O, BUTT S. Application of specific energy for lithology identification[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 184: 106402.

[编辑　曹耐]