

文章编号: 1000-0747(2020)04-0798-11 DOI: 10.11698/PED.2020.04.17

油气多相流磁共振在线检测方法及装置

邓峰¹, 熊春明¹, 陈诗雯¹, 陈冠宏¹, 王梦颖¹, 刘化冰², 张建军¹,
雷群¹, 曹刚¹, 徐东平⁴, 陶冶¹, 肖立志³

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 北京青檬艾柯科技有限公司, 北京 100089; 3. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 4. 中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所, 北京 100081)

基金项目: 国家自然科学基金“油气井多相流核磁共振在线检测新装置与新方法研究”(51704327)

摘要: 针对目前油气田现场广泛采用的多相流分离检测技术存在的效率低、精度差、数据延迟等问题, 研究基于磁共振技术的多相流在线检测方法, 形成硬件装置, 并开展室内实验及现场应用。提出“静止状态测相含率+流动状态测流速”的多相流磁共振流量测量方法; 提出采用先计量油水比再计量含气率的方法实现油、气、水三相相含率的测量。在装置研制方面, 提出可应用于流动流体测量的分段式磁体结构和双天线结构, 研发了高集成磁共振谱仪系统及配套智能化软件。室内实验及现场应用表明, 研制的多相流磁共振在线检测系统存在以下优势: 只依靠磁共振技术同时完成流量和相含率检测; 在线原位高频率检测, 实时监测油井瞬态产液波动; 能实现油、气、水三相全量程高精度检测, 且不受矿化度、乳化状态影响; 绿色、安全、低能耗。图16表4参34

关键词: 多相流; 磁共振; 流量; 相含率; 检测方法; 检测装置

中图分类号: TE53

文献标识码: A

A method and device for online magnetic resonance multiphase flow detection

DENG Feng¹, XIONG Chunming¹, CHEN Shiwen¹, CHEN Guanhong¹, WANG Mengying¹, LIU Huabing²,
ZHANG Jianjun¹, LEI Qun¹, CAO Gang¹, XU Dongping⁴, TAO Ye¹, XIAO Lizhi³

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 2. Beijing Limecho Technology Co., Ltd, Beijing 100089, China; 3. China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: Most multiphase flow separation detection methods used commonly in oilfields are low in efficiency and accuracy, and have data delay. An online multiphase flow detection method is proposed based on magnetic resonance technology, and its supporting device has been made and tested in lab and field. The detection technology works in two parts: measure phase holdup in static state and measure flow rate in flowing state. Oil-water ratio is first measured and then gas holdup. The device is composed of a segmented magnet structure and a dual antenna structure for measuring flowing fluid. A highly compact magnetic resonance spectrometer system and intelligent software are developed. Lab experiments and field application show that the online detection system has the following merits: it can measure flow rate and phase holdup only based on magnetic resonance technology; it can detect in-place transient fluid production at high frequency and thus monitor transient fluid production in real time; it can detect oil, gas and water in a full range at high precision, the detection isn't affected by salinity and emulsification. It is a green, safe and energy-saving system.

Key words: multiphase flow; magnetic resonance (MR); flow rate; phase holdup; detection method; detection device

引用: 邓峰, 熊春明, 陈诗雯, 等. 油气多相流磁共振在线检测方法及装置[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 798-808.
DENG Feng, XIONG Chunming, CHEN Shiwen, et al. A method and device for online magnetic resonance multiphase flow detection[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 798-808.

0 引言

目前, 油气井及管道多相流的在线、定量检测已成为业界共同关注的难题^[1], 尚无可靠技术能够在不经过油、气、水三相分离的前提下准确测量多相流各组分流量。传统的三相分离测量方法(玻璃管量油、翻

斗量油等)效率低、成本高、占地大、数据延迟等问题突出, 且无法反映井口真实瞬态产液特征。近年来, 多相流在线测量技术及仪器^[2-15]得到广泛关注并逐步发展, 利用该技术, 井口采出流体可在未经稳定、分离及全工艺处理等过程前就在线完成流量计量, 最小化人为因素影响, 真实反映井口流体的瞬态性能, 对

油藏精细管理、生产分配优化及井口测试等有重要意义。但是,现有的多相流检测技术仍然存在一些现实问题,包括仪器标定困难、具有放射性、适用范围有限、解释处理模型复杂、维护成本高等。此外,随着非常规油气资源开采规模的扩大及非常规油气井数量的逐年增多,多相流计量需面对更多的高含气、高含水、高黏度、高矿化度产出液,这些因素的出现将直接导致现有流量计的测量误差呈指数上升,甚至出现无法计量的情况。因此,有必要寻求准确、可靠、能满足油气生产实时检测需求的多相流检测装置和方法。

磁共振(MR)技术作为一种绿色、高效、准确的油气检测方法,经过多年的探索与实践,在油气储集层测井评价^[16]及室内岩石物理研究中已经得到广泛应用。MR技术可通过获取储集层流体分子尺度的信息实现对流体的定性/定量评价^[17],独特的测量原理及方式决定了其理论上具备同时测量多相流的流量和相含率的能力,即实现多相流在线检测的潜力巨大。但是,油气井和管道多相流受到流体运动状态和恶劣工作环境的显著影响^[18-21],使得现有实验室MR技术和仪器难以直接应用到油气井和管道多相流定量检测中,需要研究新方法,满足实际应用要求。

针对以上问题,本文提出MR多相流在线检测方法,形成硬件装置,并开展室内实验及现场应用。

1 理论及方法

1.1 多相流计量

油气多相流量计的主要功能就是在不进行三相分离的前提下测量油、气、水三相的流量。多相流计量问题的实质是各相瞬时流速(气相 v_g 、水相 v_w 和油相 v_o)、体积分数(气相 α 、水相 β 和油相 γ)和密度(气相 ρ_g 、水相 ρ_w 和油相 ρ_o)的检测问题。

多相流体积流量表达式为:

$$Q = S(\alpha v_g + \beta v_w + \gamma v_o) \quad (1)$$

由于 $\alpha + \beta + \gamma = 1$, (1)式可改写为:

$$Q = S\{\alpha v_g + \beta v_w + [1 - (\alpha + \beta)]v_o\} \quad (2)$$

由(2)式可以看出,为求得多相流体积流量,有5个未知数待测量。

在进行质量流量计算时,需额外考虑不同组分密度的影响,表达式为:

$$M = S\{\alpha v_g \rho_g + \beta v_w \rho_w + [1 - (\alpha + \beta)]v_o \rho_o\} \quad (3)$$

此时未知数增加到了8个,测量难度很大。

结合生产实际,油、气、水三相的密度往往可在

其他生产流程中测量出来,所以质量流量的计量和体积流量一样,实际上是各相流速和相含率(通常选择含油率和含气率)的测量。目前,针对质量流量探测的多相流量计还没有商业化应用实例。现有的商业化多相流量计均检测体积流量,本文所述的MR流量检测技术也针对体积流量进行检测。

“流速测量+相含率测量”的计量方式是目前世界上商业化多相流量计普遍采用的计量方式。不同之处在于,MR技术可同时进行流速和相含率的测量,而其他多相流量计需要采用不同技术“串联”的方式完成二者的测量,例如流速测量多采用文丘里、科氏力、互相关等技术,相含率测量多采用伽马能谱、电阻率等技术。而采用单一技术完成多相流量计计量的优势包括只需要单一探头、数据衔接性好、装置易于维护等。

1.2 MR多相流流速测量

运用MR技术对流动流体进行在线连续测量要求MR仪器探头在与被测流体之间保持连续相对运动的同时完成测量。与传统的静态测量不同的是,流动状态对MR测量的影响明显(如图1所示),MR技术在油气井多相流在线检测方面的应用需解决3个全新的科学问题:①流动速度对多相流磁化效率的影响;②流动速度对磁共振回波信号采集的影响;③MR多相流流量测量及解释问题。

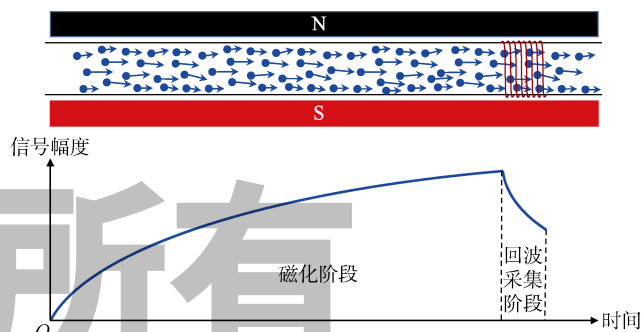


图1 流动状态下的MR测量示意图

流动速度对MR测量的影响会从原子核磁化矢量的变化反映出来。Bloch方程^[22]给出了旋转坐标系中原子核磁化矢量沿静磁场方向上的纵向分量 M_z 以及横向分量 M_x 、 M_y 随时间变化的关系:

$$\frac{dM_x}{dt} = \begin{cases} -M_x \left(\frac{1}{T_2} + Y \right) & t < \frac{A}{v} \\ 0 & t \geq \frac{A}{v} \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{dM_y}{dt} = \begin{cases} -M_y \left(\frac{1}{T_2} + Y \right) & t < \frac{A}{v} \\ 0 & t \geq \frac{A}{v} \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{dM_z}{dt} = (M_0 - M_z) \left(\frac{1}{T_1} + X \right) \quad (6)$$

以 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 脉冲序列的测量为例, 假设流体是由 i 种组分组成的混合流体, 在磁化过程和回波采集过程中的信号幅值可由 Bloch 方程推导如下:

$$M_i = S_i H_i \left\{ 1 - \exp \left[-T_w \left(\frac{1}{T_{1,i}} + X \right) \right] \right\} \quad (7)$$

$$S_i = \begin{cases} \sum_{i=1}^n M_i \exp \left[-t \left(\frac{1}{T_{2,i}} + Y \right) \right] & t < \frac{A}{v} \\ 0 & t \geq \frac{A}{v} \end{cases} \quad (8)$$

MR 测量包括样品磁化和回波采集两个过程。在样品磁化过程中, 流体进入探头后先流经磁体进行预磁化。如果流体流速很快, 磁体长度有限, 往往未充分磁化 ($T_w < 4T_1$) 就已流入天线探测区域, 则会产生“欠磁化”现象。在这种情况下, X 的表达式为:

$$X(r) = \frac{L_m}{v(r)T_w T_{1,i}} - \frac{1}{T_{1,i}} \quad (9)$$

以牛顿流体圆管层流为分析对象, 流体在泵压的驱动下流动, 根据流体力学:

$$v(r) = \frac{\Delta p}{4\mu A} (R^2 - r^2) \quad (10)$$

需要注意的是, 不同流态下的流速分布函数不同^[23-26], 这里不再逐一列出。流体流动会导致回波串的首幅值与静止测量时相比偏低, 且流速越快首幅值降低幅度越大。在实际应用中, 回波串幅值的降低意味着信噪比^[27-31]的下降, 为了保证较高的信噪比, 提高测量精度, 期望多相流的预磁化时间越长越好, 这也是影响流量测量上限的决定性参数之一。

流量测量过程中也会出现“过磁化”现象。在一些对测量频率要求较高的应用场景中(流态、流量或组分含量变化频繁), 两次回波串测量间隔很短, 设定的 T_w 较短 ($T_w < 4T_1$)。在这种情况下, 天线所采集到的实际上是经磁体磁化后进入天线的样品和天线内正在进行磁化的样品两部分磁化强度的和:

$$M_i = S_i H_i \frac{v(r)T_w}{A} + S_i H_i \left[1 - \exp \left(\frac{-T_w}{T_{1,i}} \right) \right] \left[1 - \frac{v(r)T_w}{A} \right] =$$

$$S_i H_i \left\{ 1 - \exp \left[-T_w \left(\frac{1}{T_{1,i}} + X \right) \right] \right\} \quad (11)$$

此时 X 的表达式为:

$$X(r) = \begin{cases} \frac{-1}{T_w} \ln \left[1 - \frac{v(r)T_w}{A} \right] \approx \frac{v(r)}{A} & v(r)T_w < A \\ +\infty & v(r)T_w \geq A \end{cases} \quad (12)$$

回波采集阶段, 天线采集到第 N 个回波的时候已经有一部分经 90° 脉冲扳转的磁化矢量离开天线, 而 90° 脉冲后新进入天线的那部分样品由于未被 90° 脉冲扳转, 故无法采集到回波信号。 Y 的表达式推导如下:

$$Y(r) = -\frac{1}{t} \ln \left[1 - \frac{v(r)t}{A} \right] \approx \frac{v(r)}{A} \quad (13)$$

由 (13) 式可知, 流体流动造成回波串信号的额外衰减, 且衰减幅度几乎与流速成正比, 可通过其测量流速。图 2 是流体流动造成的采集信号额外衰减示意图, 静止状态下回波串遵循 Bloch 方程进行 e 指数衰减(弛豫衰减), 而流体流动会在此基础上造成回波串的额外衰减。

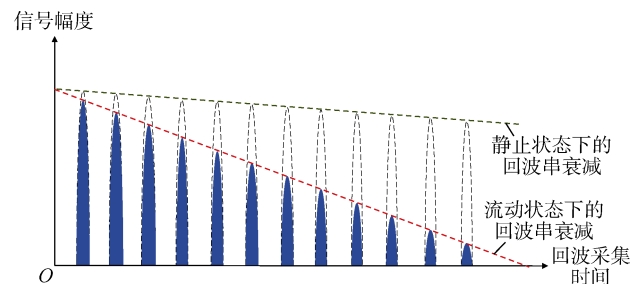


图 2 流动对 MR 回波采集过程的影响

由于流动状态下测量得到的回波串数据是回波弛豫衰减和流动引起的衰减两部分的加权和, 为求得流速, 需要从回波串信号中消除正常的回波弛豫衰减, 而只保留流动引起的衰减。步骤如下: ①在流体静止的状态下采集一个回波串数据 M_{static} , 并对这组回波串数据做奇异值分解 (SVD)^[32] 及归一化处理, 得到 $M_{\text{static-SVD}}$ 曲线 (见图 3); ②在流动状态下, 采用与静止状态下同样的测量参数 (回波间隔时间 T_E 和回波个数 N) 测量得到回波串数据 M_{flow} , 做 SVD 及归一化处理, 得到 $M_{\text{flow-SVD}}$ 曲线 (见图 3); ③将 $M_{\text{flow-SVD}}$ 除以 $1 - M_{\text{static-SVD}}$ 以消除回波弛豫衰减, 得到 $M_{\text{flow-SVD-SC}}$ 曲线 (见图 3), 该曲线就是流动造成衰减的回波串拟合曲线。对 $M_{\text{flow-SVD-SC}}$ 曲线进行线性拟合, 得到直线 $M_{\text{flow-SVD-SC}} = 1 - v/A$, 即可直接计算得到平均流速 v 。

需要指出的是, 实验表明, 常规油、气、水多相

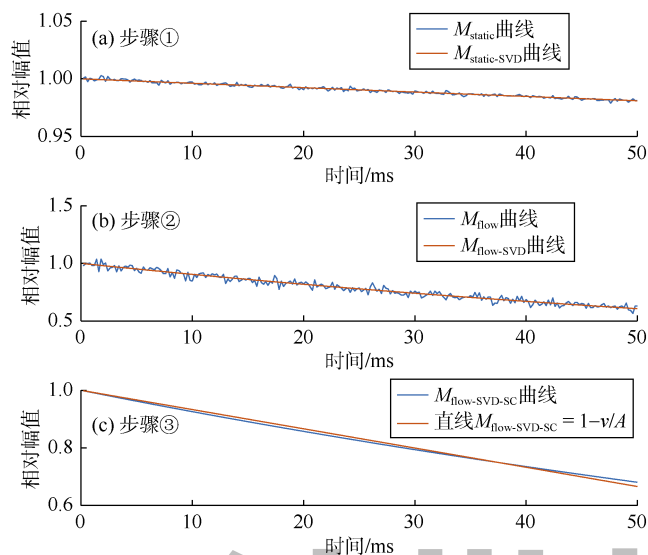


图3 流速测量方法各步骤所得曲线示意图

流采集得到的回波串数据,前 50 ms 的线性度较好,可用于计算流速,但对于高黏度采出液,这一时间应该更短。另外,之所以选择对采集得到的回波串数据进行 SVD 处理后再校正,而不直接对原始回波串进行操作,是因为 SVD 后的回波串数据的噪声已得到抑制,所以采用这种方法重构回波串数据不会造成噪声的额外放大。另外,流速越小,流体磁化矢量自由衰减对流速测量的影响越不能忽视,需要校正。该方法应用需要采集一个静止状态下的流体回波串信号,其实现方法将在后文详细说明。

1.3 MR 相含率检测

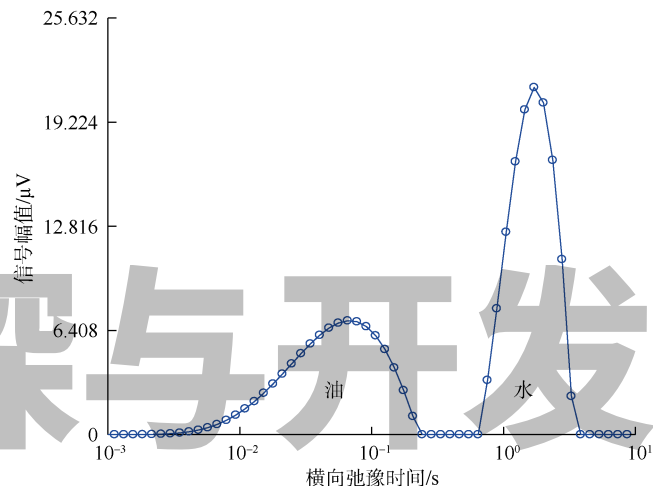
依靠弛豫时间 (T_2 或 T_1) 进行流体组分定量分析的 MR 技术被称为一维 MR 技术,测量方法分别为 CPMG 脉冲序列和“反转恢复”脉冲序列。获取流体 T_2 信息的 CPMG 脉冲序列较获取流体 T_1 信息的“反转恢复”脉冲序列耗时更短,应用于流量计量这类具有时间依赖性的工业在线测量环境中更具优势。但是,单次 T_2 测量的时间往往在 0.5~5.0 min,显然不适合在流动状态下测量,因此需要借助其他手段,使管道内的多相流在相含率测量阶段暂时保持静止。

通常情况下,多相流中油相的 T_2 最短,水相次之,天然气的 T_2 最长,理论上从 T_2 谱上就可以对三者进行区分,但实际情况是气相信号非常微弱,且受管道压力影响,很难直接计量。本文提出一种先计量油水比再计量含气率的方法,实现油、气、水三相相含率的测量。

油水比可以直接利用图 4 所示的 T_2 谱上油峰和水峰的面积计算得到:

$$R_{ow} = \frac{S_o}{S_w H_o} \quad (14)$$

由于水的含氢指数为 1, (14) 式中没有体现,而油的含氢指数 H_o 需要依靠室内刻度实验测量得到:采集同等体积的纯油和纯水样品,放置于 MR 探头内采集自由衰减信号 (FID),二者信号幅值之比就是 H_o 。

图4 多相流 T_2 谱示例

由于气体的含氢指数较低,MR 信号较弱,容易被噪声淹没,尤其当管内压力较低时 (小于 1 MPa),几乎无法采集到气相信号。因此,本文提出一种推导法计算含气率,而不直接测量。

首先,对于油气井及管道多相流,始终满足以下关系:

$$A_l + A_g = 1 \quad (15)$$

假设被测多相流不含气相,采集得到的回波串首幅值为:

$$M_{pl} = \frac{R_{ow}}{1 + R_{ow}} M_w + \frac{1}{1 + R_{ow}} M_w H_o \quad (16)$$

实际测量采集得到的回波串首幅值 M_m 是已知数,且有如下关系式:

$$M_m = A_l M_{pl} + A_g M_{pg} \quad (17)$$

(17) 式中 M_{pg} 是管道内全部是气相时采集得到的信号幅值,该参数与管内压力相关,准确测量难度较大。针对这一问题,采用滤除气相信号的方法,即在 CPMG 脉冲序列前加 1 个 3~5 倍于回波间隔时间的间隔时间,这样气相信号会快速衰减,采集得到的回波串首幅值将不包含气相的贡献,反演的 T_2 谱也将没有气相的谱峰,即:

$$M_{pg} = 0 \quad (18)$$

联立 (14) 式— (18) 式,即可求得含气率 A_g 。

值得注意的是,实际测量时有时会遇到多相流中气相不仅有烃类气体,还包含二氧化碳、硫化氢、空气(非满管流)等气体的情况,采用上述方法无法区分每种气体的具体含量,此时若需准确计量烃类气体含量,可采用对管道加压(大于 1 MPa)直接测量气相 T_2 谱的方法实现。

需要指出的是,用于相含率测量的 MR 弛豫时间信息,还可直接应用于流体性质(如黏度、分子链长、重度、含氢指数等)检测而不需要额外的测量工序。

2 装置研制

多相流 MR 在线检测系统(MRMF)如图 5 所示,主体包含 MR 探头、谱仪、阀门组及管汇几个部分。其中 MR 探头由铝合金外壳、磁体及骨架、天线、流体管、温控系统、隔热防爆层等组件构成,为 MR 测量提供必要的静磁场和射频场环境;谱仪包含电子线路和上位机软件 2 个部分,电子线路主要功能是控制天线射频脉冲的发射和回波信号的接收及处理,同时具备磁体温控、阀门控制等功能,上位机软件用于人机交互,主要功能包括逻辑控制参数输入、数据处理及解释、数据及曲线显示等;阀门组及管汇用于实现“静止状态相含率测量”和“流动状态流速测量”2 个模式的切换。



图 5 多相流 MR 在线检测系统

由于 MRMF 的应用环境是油气田现场,相比于实验室内的常规 MR 仪器,需额外考虑防护、防爆、环境适应性等一系列问题。MRMF 的主要设计参数及指标如表 1 所示。

2.1 MR 探头

多相流各相流速及流态的不断变化对 MRMF 的精确性、可靠性、时效性等提出了非常苛刻的要求。MRMF 的探头经特殊设计而成,较传统静态测量核磁

表 1 MRMF 主要设计参数及指标

参数/指标	数值	参数/指标	数值
尺寸	2.0 m×0.6 m×0.7 m	流量计量范围	2~200 m ³ /d
质量	500 kg	量程比	100:1
管道尺寸	Φ40 mm, Φ50 mm	油相相含率测量范围	0~100%
防爆等级	Ex d IIB T6 Gb	水相相含率测量范围	0~100%
防护等级	IP63	气相相含率测量范围	0~100%
功率	200 W	液相计量相对误差	5%
工作电压	220 V (交流)	气相计量相对误差	10%
环境温度	-50~80 ℃		

共振仪器结构更为复杂。MR 探头的核心组件为磁体和天线,分别用于产生静磁场和射频场。

MR 探头利用永磁材料提供所需的静磁场。磁体横截面采用 Halbach 结构^[33-34],用于在探头内部形成一个均匀磁场区域,同时利用该结构“零漏磁”的优势,提升 MRMF 现场使用的安全性。磁体轴向上采用多段式结构,分为预磁化区域和探测区域两部分(见图 6)。设计预磁化区域磁场强度略高于探测区域磁场强度,以实现多相流的快速磁化,探头磁场分布如图 6 所示。

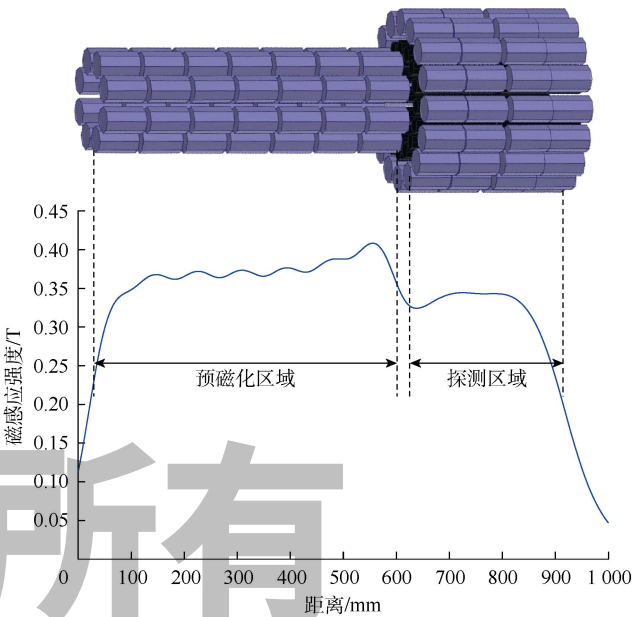


图 6 磁体结构及轴向磁场分布

天线采用螺线管结构,置于磁体探测区域内,用于产生射频场,激发被测样品中的质子发生能级跃迁,之后接收 MR 信号,观测 MR 现象。MRMF 采用双螺线管天线结构(见图 7),其中主天线置于均匀静磁场区域,用于采集多相流弛豫信息,而副天线置于均匀梯度静磁场区域,用于采集多相流扩散信息。

2.2 谱仪

谱仪作为 MRMF 的重要组成部分,主要完成脉冲

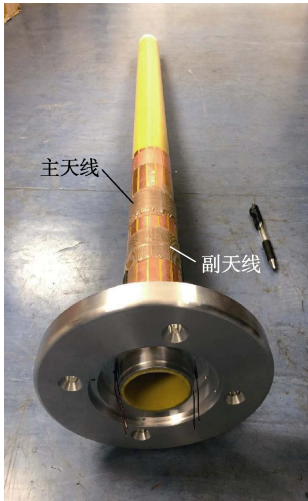


图 7 天线装配实物照片

序列的时序生成、探头控制命令的生成、激励天线发射射频脉冲和回波信号的放大及采集等。谱仪可分为电子线路和上位机软件两部分，如图 8 所示。

MRMF 的谱仪根据实际需求，较传统 MR 谱仪实现了更为复杂的功能：①控制阀门组的开合以实现 MRMF 静止测量模式和流动测量模式的切换；②控制磁体温度；③实现了数据采集、处理及解释智能化，全过程自动化，现场无人值守；④开发了基于 Web 的上位机软件，需要时可通过手机、平板电脑等对设备进行无线控制及数据传输；⑤高度集成，谱仪尺寸为 200 mm×170 mm×200 mm。

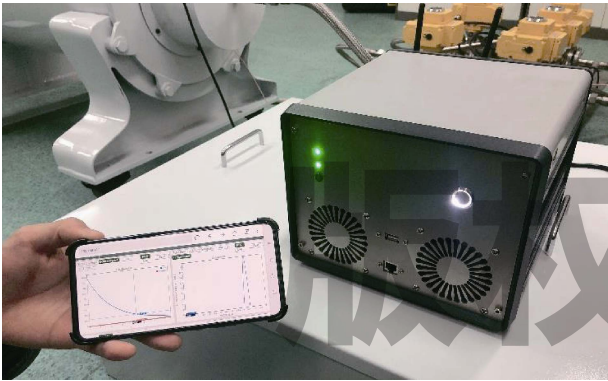


图 8 谱仪及上位机软件实物照片

2.3 阀门组及管汇

“静止状态测相含率、流动状态测流速”是 MRMF 所采用的流量计量方法，其实现需要依靠可控阀门组及相应管汇，如图 9 所示。MRMF 采用了两个“T 型”阀门，由谱仪统一控制。实际安装时，两个“T 型”阀门的一侧经旁路管线短接，另一侧对接 MR 探头内流体内，剩下 1 个口作为多相流“流入/流出”口，该

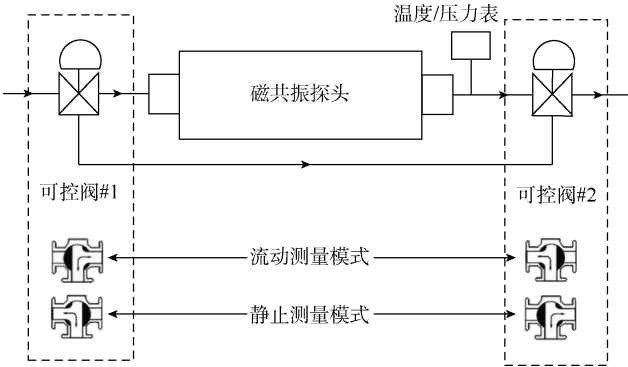


图 9 阀门组及管汇示意图

口通过软管与井口采油树、输油管、计量间或技术站管汇相连，将待测多相流导入 MRMF。流动测量模式下，多相流全部流过 MR 探头内流体内，进行流速测量。静态测量模式下，多相流全部由支管道流过，探头内流体静止，进行相含率测量。值得注意的是，阀门及管汇均水平安装，在水平管流状态下测量多相流。

3 室内实验

室内刻度实验可保证 MRMF 工作于最优状态且流量解释结果准确可靠。刻度实验在中国石油勘探开发研究院多相流实验室完成，该实验室具备一套多相流循环测试系统（装置示意图见图 10），系统由多相流存储、外输、计量、混合、分离、回注几部分组成。可控泵送单相流体（白油、纯水、空气）至各相的单相流量计计量，再经混相器混合后流经 MRMF 并检测，3 个单相流量计的计量结果用于刻度及检定 MRMF。室内刻度实验包含流量刻度和相含率刻度两个部分。

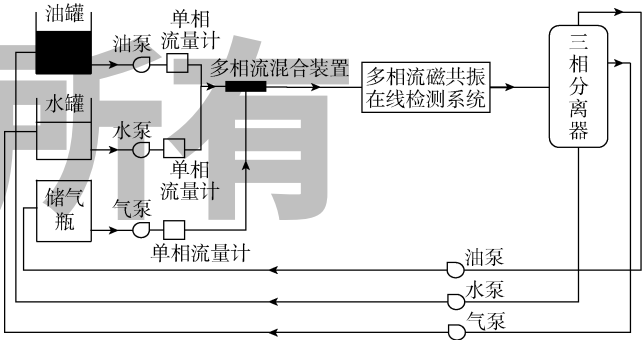


图 10 多相流循环测试系统装置示意图

3.1 流量刻度实验

将 MRMF 阀门切换至流动测量模式，然后通过中控台设置，分别向 MRMF 泵入不同流量、不同比例的多相流体，拟合流速，以确定拟合参数。实验参数为：磁体温度 25 ℃，管内压力 0.1 MPa，回波间隔时间 200

μs , 回波个数 250, 总流量 $1\sim 200\text{ m}^3$ (均匀布点 100 个), 覆盖了 MRMF 的可测流量范围。

图 11a 是在泵入不同流量、同一油水气比 (油:水:气=1:1:0.2) 的多相流后采集得到的回波串数据。图 11b 是 MR 测量流量和实际泵入流量的对比, 可以看到二者吻合度较高, 相关系数为 0.974。需要注

意的是, 为提高流量解释精度, 需截取回波串里线性度较好的前几个回波数据进行解释。流量刻度实验在不同流量下选取回波串的截止时间为: 流量小于 $50\text{ m}^3/\text{d}$ 时, 选取前 50 ms 的回波串; 流量在 $50\sim 100\text{ m}^3/\text{d}$ 时, 选取前 20 ms 的回波串; 流量大于 $100\text{ m}^3/\text{d}$ 时, 选取前 10 ms 的回波串。

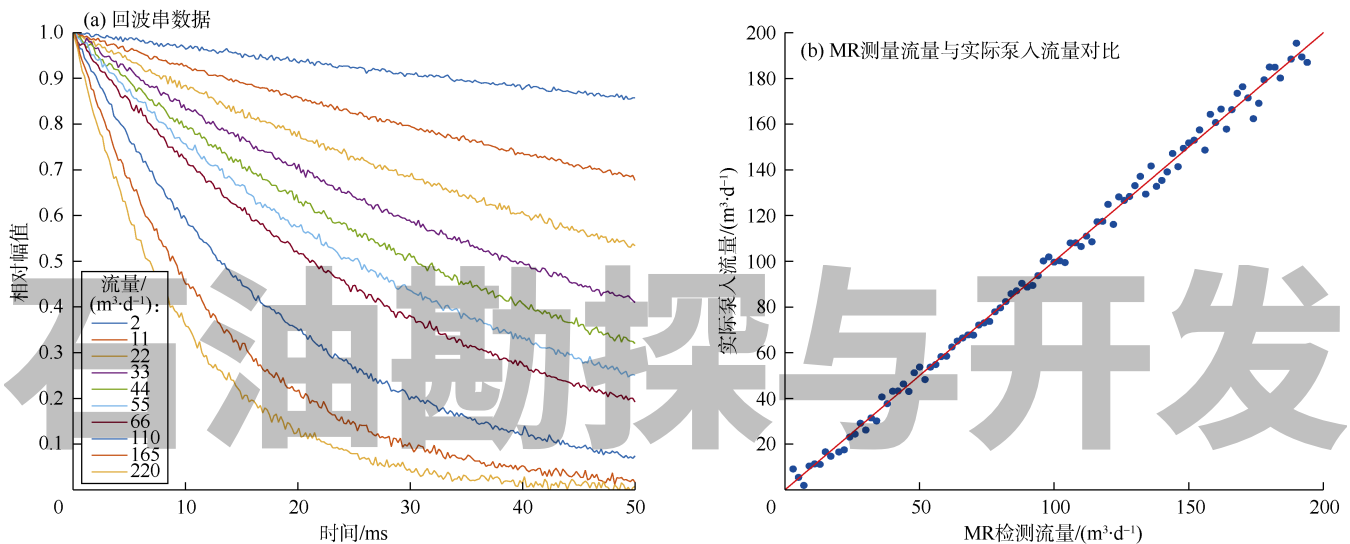


图 11 流量刻度实验结果

3.2 相含率刻度实验

分别向 MRMF 泵入不同油水比的油、水两相流体。每改变一次油水比, MRMF 阀门均由流动测量模式切换至静态测量模式, 然后进行 T_2 谱测量。实验参数为: 磁体温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 管内压力 0.1 MPa , 回波间隔时间 $200\text{ }\mu\text{s}$, 回波个数 40 000, 油水比 $0\sim 1$ 。实验所得 T_2 谱如图 12a 所示。根据油水比为 0 与 1 时所采集回波串首幅值的比值, 得到实验用白油的含氢指数为 0.98。将 $T_2=0.5\text{ s}$ 作为油水分界线, 左侧为油峰, 右侧为水峰,

计算该分界线左右谱峰面积, 结合 (14) 式, 计算得到油水比, 如表 2 所示, 相对误差为 2.20%。

分别向 MRMF 泵入不同含气率的气水两相流体。每改变一次含气率, MRMF 阀门均由流动测量模式切换至静态测量模式, 然后进行回波串测量。实验参数为: 磁体温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 管内压力 0.1 MPa , 回波间隔时间 $200\text{ }\mu\text{s}$, 回波个数 10 000, 含气率 $0\sim 90\%$ 。实验所得回波串如图 12b 所示。根据回波串首幅值计算含气率, 结果如表 3 所示, 相对误差为 3.10%。

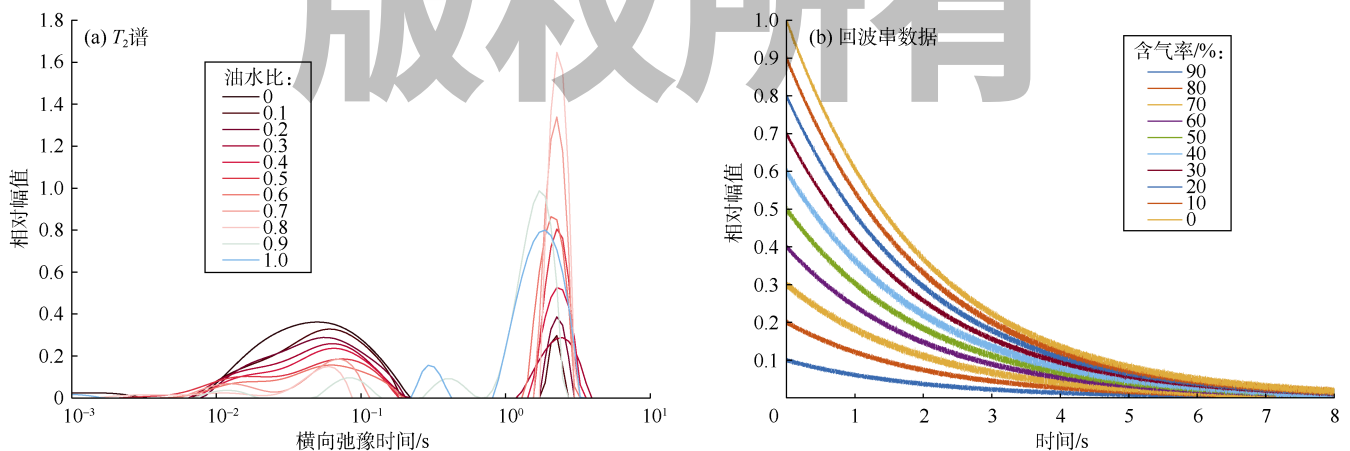


图 12 相含率刻度实验结果

表 2 油水比测量值与设定值对比

油水比设定值	油水比测量值	油水比设定值	油水比测量值
0.100	0.094	0.600	0.604
0.200	0.205	0.700	0.719
0.300	0.301	0.800	0.783
0.400	0.406	0.900	0.885
0.500	0.527	1.000	1.000

表 3 含气率测量值与设定值对比

含气率 设定值/%	含气率 测量值/%	含气率 设定值/%	含气率 测量值/%
10	10.3	60	54.5
20	19.5	70	71.5
30	28.4	80	82.7
40	40.8	90	90.1
50	51.5		

分别向 MRMF 泵入不同油气水比的三相流体，先通过采集回波串首幅值确定含气率，再通过 T_2 谱确定油水比，最后得到三相各自的相含率。实验参数为：磁体温度 25 ℃，管内压力 0.1 MPa，回波间隔时间 200 μ s，回波个数 40 000。实验结果如表 4 所示，含油率

表 4 三相流相含率测量值与设定值对比

含油率 设定值/%	含气率 设定值/%	含水率 设定值/%	含油率 测量值/%	含气率 测量值/%	含水率 测量值/%
10	10	80	10.2	10.8	79.0
10	20	70	10.2	20.7	69.1
10	30	60	9.9	29.1	61.0
10	40	50	10.1	39.0	50.9
10	50	40	10.2	50.2	39.6
10	60	30	9.7	59.1	31.2
10	70	20	9.5	69.4	21.1
10	80	10	10.6	78.9	10.5
20	10	70	20.5	6.5	73.0
20	20	60	20.3	20.7	59.0
20	30	50	20.7	27.9	51.4
20	40	40	20.1	37.9	42.0
20	50	30	20.6	50.3	29.1
20	60	20	19.5	59.5	21.0
20	70	10	20.1	71.1	8.8
30	10	60	31.0	10.0	59.0
30	20	50	30.9	21.1	48.0
30	30	40	30.5	31.5	38.0
30	40	30	29.5	41.1	29.4
30	50	20	28.0	52.2	19.8
30	60	10	30.2	60.3	9.5
40	10	50	40.1	10.1	49.8
40	20	40	37.0	24.1	38.9
40	30	30	41.1	28.6	30.3
40	40	20	41.2	39.2	19.6
40	50	10	39.0	51.1	9.9
50	10	40	48.9	11.4	39.7
50	20	30	51.1	18.9	30.0
50	30	20	48.3	33.0	18.7
50	40	10	50.9	39.2	9.9
60	10	30	60.2	11.0	28.8
60	20	20	60.5	19.0	20.5
60	30	10	58.0	31.8	10.2
70	10	20	73.1	6.7	20.2
70	20	10	72.2	18.0	9.8
80	10	10	78.6	11.2	10.2

相对误差为 2.57%，含气率相对误差为 6.41%，含水率相对误差为 2.86%。

3.3 油水乳化及矿化度影响分析实验

油气井及管道中多相流各相之间往往呈乳化状态。在这种情况下，大多数多相流量计尤其是容积式流量计无法准确分析相含率。此时，MR 技术的优势就得以展现。MR 技术直接获取多相流分子级别的信息，其测量原理决定了其理论上不受乳化影响。为了证实这一点，本文进行了实验研究。图 13 为采用 MRMF 测量得到的某油田乳化原油的 T_2 谱，据此得出该原油含水率达 71.2%，与实验室内脱水分析结果吻合，证实了本文方法对于检测呈乳化状的多相流有其独特优势。

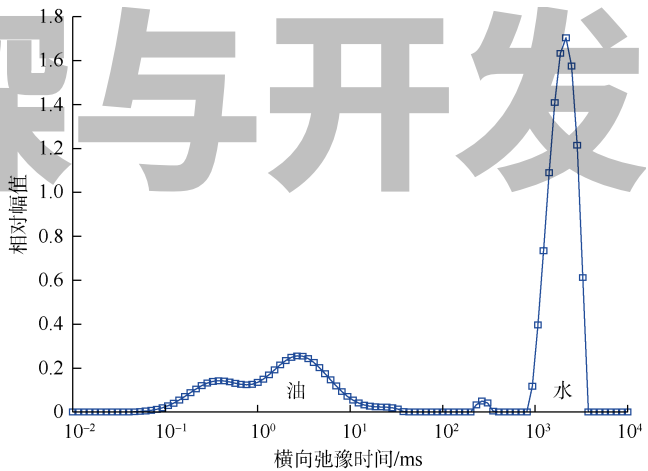


图 13 乳化原油 T_2 谱

不同油田、油井采出多相流的矿化度各不相同，有必要分析矿化度对 MR 测量的影响。图 14 是不同浓度的 KCl、NaCl、CaCl₂ 的 T_2 测量结果，可以看到，对于这 3 种常见的地层水中所含矿物质，即使浓度达到 17%，含有不同矿物质的水的 T_2 值最大差距也在 700 ms 以内，且 T_2 值均不低于 2 s，不会与油峰发生混叠情况，即不影响相含率的测量。现场采出液也存在多

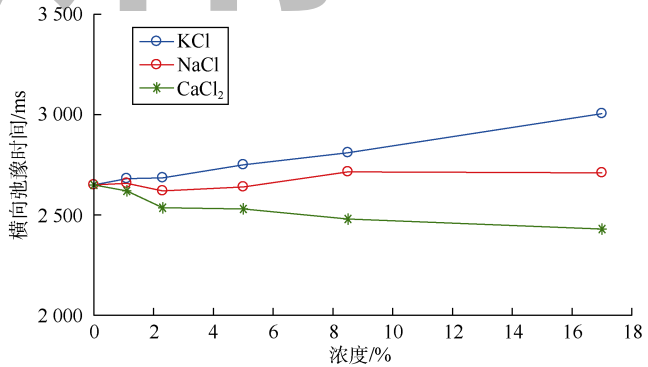


图 14 含有不同浓度矿物质的水的 T_2 值

种矿物质同时存在的情况,但从机理上讲,只要流体中不含有顺磁性物质,多种对 MR 测量无明显影响的矿物质混合后对 MR 测量的影响也可忽略不计。

实际上,MR 的测量原理决定了其测量结果不但不受乳化状态、矿化度影响,电导率、温度、黏度、密度、透明度等对其他流量计有影响的参数也不会对其测量造成影响。

3.4 结果及讨论

室内实验表明,经过刻度的 MRMF 的测量精度优于设计指标。流量测量方面,针对不同的流量范围选取合适的回波串截止时间,可实现高频率(0.5 次/s)、高精度(相关系数 0.974)流量在线计量;相含率检测方面,油气水三相均可实现全量程检测,两相流体检测精度为油水比相对误差 2.2%,气水比相对误差 3.1%,三相流体检测精度为油相相对误差 2.57%,气相相对误差 6.41%,水相相对误差 2.86%。

4 现场应用

MRMF 目前已在吉林大老爷府作业区#20 计量间开展现场测试及应用(见图 15)。MRMF 的进出口法兰通过软管接至计量间内的油气管线,计量间内通过手动阀门切换的方式实现选井。该计量间管理的 24 口井均是水驱开采多年的老井,历史数据表明,平均单井产出液含水率达 96%,间歇产气。于 2019 年 9 月 2

日起采用 MRMF 对该计量间的 24 口井连续计量 3 个月,设备工作稳定,未出现异常。MRMF 测量参数设定为:①静止状态相含率测量,回波间隔时间 200 μs ,回波个数 40 000,累加次数 4 次,测量频率 2 次/h;②流动状态流速测量,回波间隔时间 200 μs ,回波个数 250,累加次数 4 次,测量频率 0.15 次/s。



图 15 MRMF 在油田计量间内应用现场图

现场采用翻斗流量计和车载流量计与 MRMF 计量结果进行对比,测量结果吻合度高。图 16 截取了 6 个井环各 4 h 的流量实测数据。与翻斗流量计的测试结果对比表明:①产液量的 MRMF 测量结果与翻斗计量结果吻合度高,平均达到 95.6%;②采用 MRMF 能及时发现异常工况,如井环 10-26, 8-28, 6-028 在 0.4 h 处

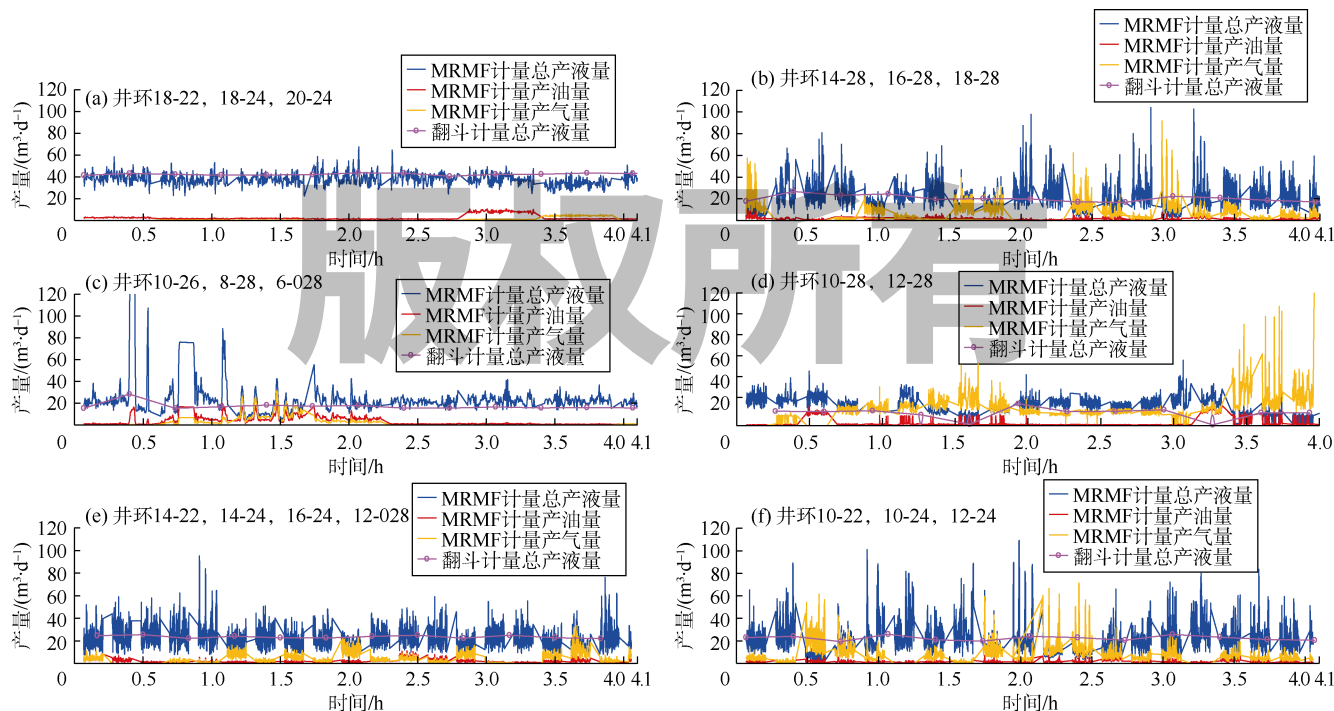


图 16 吉林油田大老爷府作业区#20 计量间 6 个井环实测曲线

出现的流量异常, 实际导致了管道的异常高压(压力表显示), 但翻斗计量结果只出现一个较小的波动; ③翻斗流量计只能计量总产液量, MRMF 还可计量含气量和含水率; ④含气井流态复杂, 管内流量出现的波动可被 MRMF 及时捕捉。

5 结论

基于磁共振技术的多相流在线检测方法采用“静态相含率+动态流速”的测量方法, 同时进行流速和相含率的测量; 利用回波串衰减速率测量流速, 同时针对低流量应用场景提出回波串校正方法, 以进一步提高测量精度; 采用多相流非分离相含率测量方法, 先计量油水比再计量含气率, 实现油、气、水三相相含率的测量。在方法研究的基础上形成硬件装置, 采用可应用于流动流体测量的分段式磁体结构和双天线结构, 研发了高集成磁共振谱仪系统及配套智能化软件。

室内刻度及检定实验表明, 本文研制的多相流磁共振在线检测系统在测量精度方面优于现在主流商业化多相流量计, 证明了方法的可行性和装置的可靠性。在吉林油田开展现场测试, 日均总产液量计量结果与现场翻斗计量结果吻合度达 95.6%。相比于其他多相流检测技术, 本文方法优势明显: ①只依靠一种技术同时完成流量和相含率检测; ②在线原位高频率检测, 实时监测油井瞬态产液波动, 为油藏动态分析提供重要且丰富的数据; ③能实现油、气、水三相全量程高精度检测, 且不受矿化度、乳化状态影响; ④绿色、安全、低能耗。

符号注释:

A ——磁共振探头天线的长度, m; A_l , A_g ——液相和气相的相含率, %; H_i ——第 i 种组分的含氢指数; H_o ——油的含氢指数; L_m ——磁体长度, m; M ——质量流量, kg/s; M_0 ——平衡状态的磁化强度; M_{flow} ——在流动状态下测量得到的回波串数据; $M_{flow-SVD}$ ——在流动状态下采集的回波串经奇异值分解(SVD)及归一化处理后的数据; $M_{flow-SVD-SC}$ —— $M_{flow-SVD}$ 与 $1-M_{static-SVD}$ 之商; M_i ——磁化过程结束时流体样品中第 i 种组分的磁化强度; M_{pg} , M_{pl} ——管道内全部是气相、液相时采集得到的信号幅值; M_m ——实际测量采集得到的多相流回波串首幅值; M_{static} ——在流体静止状态下采集的回波串数据; $M_{static-SVD}$ ——在流体静止状态下采集的回波串经奇异值分解及归一化处理后的数据; M_w ——管道内全部是水时采集得到的信号幅值; M_x , M_y ——旋转坐标系中原子核磁化矢量沿静磁场方向上的横向分量; M_z ——旋转坐标系中原子核磁化矢量沿静磁场方向上的纵向分量; N ——回波个

数; n ——流体组分数; Q ——体积流量, m^3/s ; r ——管道横截面上某点到中心点的距离, m; R ——管道内径, m; R_{ow} ——油水比; s_i ——采集得到的回波信号幅值; S ——管道横截面积, m^2 ; S_i ——第 i 种组分的饱和度, %; S_o , S_w —— T_2 谱上油峰和水峰的面积, m^2 ; t ——回波采集时间, s; T_1 , T_2 ——纵向和横向弛豫时间, s; $T_{1,i}$, $T_{2,i}$ ——第 i 种组分的纵向和横向弛豫时间, s; T_E ——回波间隔时间, s; T_w ——磁化时间, s; v ——平均流速, m/s; $v(r)$ ——管道横截面上距离中心点 r 处的流体流速, m/s; v_g , v_w , v_o ——气、水、油相流速, m/s; X , Y ——流体流动对磁化过程和回波采集过程的影响因子, s^{-1} ; α , β , γ ——气、水、油相体积分, %; Δp ——管道两端的压差, Pa; μ ——流体黏度, Pa·s; ρ_g , ρ_w , ρ_o ——气、水、油密度, kg/m^3 。

参考文献:

- [1] API. API recommended practice for measurement of multiphase flow: API RP 86-2005[S]. Washington: API Publishing Services, 2005.
- [2] 赵永成. 油井多相不分离在线自动检测与计量方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 2-5.
ZHAO Yongcheng. On-line automatic measurement methods of multiphase flow of the well in no separation[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 2-5.
- [3] SHI Junfeng, DENG Feng, XIAO Lizhi, et al. A proposed NMR solution for multi-phase flow fluid detection[J]. Petroleum Science, 2019, 16(5): 1148-1158.
- [4] ELSHAFEI M, AL-SUNNI F, EL-FERIK S. Multiphase flow measurement system and method: US9068873B2[P]. 2015-06-30.
- [5] 兰州海默科技股份有限公司. 多相流的正电子断层成像装置及方法: CN102565844B[P]. 2016-02-10.
Lanzhou Haimo Technology Co. Ltd. Positron tomography device and method for multiphase flow: CN102565844B[P]. 2016-02-10.
- [6] 高书香, 周星远, 单秀华, 等. 国内在线不分离式多相流量计技术现状[J]. 油气储运, 2019(6): 667-671.
GAO Shuxiang, ZHOU Xingyuan, SHAN Xiuhua, et al. The technical status of in-line multiphase flow meter in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019(6): 667-671.
- [7] 苏欣, 袁宗明, 范小霞. 多相流量计的研究与应用[J]. 石油化工自动化, 2006(1): 93-98, 101.
SU Xin, YUAN Zongming, FAN Xiaoxia. Research and application of multiphase flowmeter[J]. Automation in Petrochemical Industry, 2006(1): 93-98, 101.
- [8] 李轶. 多相流测量技术在海洋油气开采中的应用与前景[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(1): 90-98.
LI Yi. Application and perspective of multiphase flow metering technologies for ocean oil and gas exploitation[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(1): 90-98.
- [9] THORN R, JOHANSEN G A, HJERTAKER B T. Three-phase flow measurement in the petroleum industry[J]. Measurement Science & Technology, 2013, 24(1): 012003.
- [10] SIMURDA M, DUGGEN L, BASSE N T, et al. Fourier collocation approach with mesh refinement method for simulating transit-time ultrasonic flow meters under multiphase flow conditions[J]. IEEE

- Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2018, 65(2): 244-257.
- [11] KARTUSHINSKY A, BALAKIN B V, KUTSENKO K V, et al. Numerical study of gas-liquid flow morphology in a vertical flowmeter nozzle[R]. Thessaloniki, Greece: International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2017), 2017.
- [12] 潘艳芝, 王栋, 巩大利, 等. 一种计量稠油中油气水三相流的方法和装置研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(7): 140-144.
PAN Yanzhi, WANG Dong, GONG Dali, et al. Investigation on the oil-water-gas measurements in viscous oil[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(7): 140-144.
- [13] 韩云峰, 安维峥, 孙钦, 等. 水下多相流量计相分率参数测量技术研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 6(S1): 172-176.
HAN Yunfeng, AN Weizheng, SUN Qin, et al. An investigation of phase volume fraction measurement technology in multiphase flowmeter[J]. Ocean Engineer Equipment and Technology, 2019, 6(S1): 172-176.
- [14] HUANG Songming. A stratified flow multiphase flowmeter: USPTO 20180348035[P]. 2018-12-06.
- [15] MARUSINA M Y, BAZAROV B A, GALAIDIN P A, et al. A magnetic system based on permanent magnets for a flowmeter of multiphase fluid media[J]. Measurement Techniques, 2014, 57(4): 461-465.
- [16] COATES G R, XIAO L Z, PRAMMER M G. NMR Logging: Principles and applications[M]. Texas: Gulf Professional Publishing, 2000.
- [17] BLÜMICH B, CASANOVA F, APPELT S. NMR at low magnetic fields[J]. Chemical Physics Letters, 2009, 477(4/5/6): 231-240.
- [18] DENG F, XIAO L Z, LIU H B, et al. Effects and correction for mobile NMR measurement[J]. Applied Magnetic Resonance, 2013, 44(9): 1053-1065.
- [19] WU Baosong, XIAO Lizhi, LI Xin, et al. Sensor design and implementation for a downhole NMR fluid analysis laboratory[J]. Petroleum Science, 2012, 9(1): 38-45.
- [20] AKKURT R. Effects of motion in pulsed NMR logging[D]. Colorado: Colorado School of Mines, 1990.
- [21] SIGAL R F, MILLER D L, GALFORD J E, et al. A method for enhancing the vertical resolution of NMR logs[R]. SPE 63215-MS, 2000.
- [22] BLOCH F. Nuclear induction[J]. Physical Review, 1946, 70(7/8): 460-474.
- [23] KOCHIN N E, KIBEL I A, ROZE N V. Theoretical hydromechanics[J]. Physics Today, 2009, 19(3): 76-76.
- [24] BINGHAM E C. Fluidity and plasticity[M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1922.
- [25] CASSON N. A flow equation for pigment oil-suspensions of the printing ink type[M]//MILL C C. Rheology of disperse systems. London: Pergamon Press, 1959: 84.
- [26] HERSCHEL W H, BULKLEY R. Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions[R]. Atlantic City: 29th Annual Meeting of the American Society Testing Materials, 1926.
- [27] MORESI G, MAGIN R. Miniature permanent magnet for table-top NMR[J]. Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering, 2003, 19B(1): 35-43.
- [28] SMITH M R, HUGHES D G. On the signal-to-noise ratio of nuclear magnetic resonance oscillator spectrometers[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 2001, 4(10): 725-729.
- [29] HOULT D I, RICHARDS R E. The signal-to-noise ratio of the nuclear magnetic resonance experiment[J]. Journal of Magnetic Resonance, 1976, 24(1): 71-85.
- [30] CASANOVA F, PERLO J, BLÜMICH B. Single-sided NMR[M]. New York: Springer, 2014.
- [31] SUN B Q, TAHERIAN R. Method for eliminating ringing during a nuclear magnetic resonance measurement: U.S. Patent 6121774[P]. 2000-09-19.
- [32] VENKATARAMANAN L. Solving Fredholm integrals of the first kind with tensor product structure in 2 and 2.5 dimensions[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(5): 1017-1026.
- [33] HALBACH K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material[J]. Nuclear Instruments & Methods, 1980, 169(1): 1-10.
- [34] BLÜMLER P. Proposal for a permanent magnet system with a constant gradient mechanically adjustable in direction and strength[J]. Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering, 2016, 46(1): 41-48.
- 第一作者简介: 邓峰 (1985-), 男, 重庆人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事采油工程、核磁共振技术研究。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院采油采气工程研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: dengfeng0719@petrochina.com.cn
收稿日期: 2019-12-15 修回日期: 2020-05-08
- (编辑 胡苇玮)