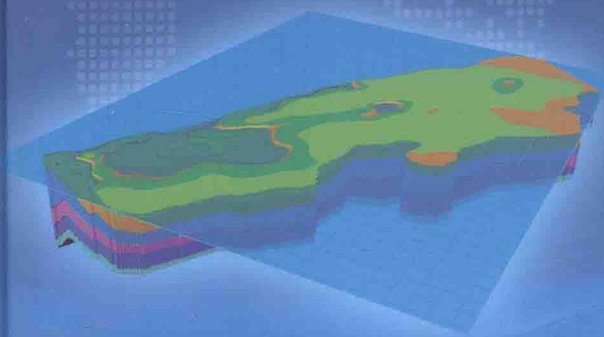




生产测井油气水多相流 测量方法与传感技术研究

孔令富 刘兴斌 李英伟 著



科学出版社

生产测井油气水多相流测量方法 与传感技术研究

孔令富 刘兴斌 李英伟 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

油气水多相流普遍存在于油田开发中后期的油井中,其流动参数的准确测量对石油生产过程控制及资源合理开发具有重要意义,但油气水多相流的复杂性和随机性致使其参数检测的难度很大。本书全面系统地介绍了油田生产测井油气水多相流电导传感技术、光纤传感技术和电磁传感技术。全书共12章,第1章介绍了油气水多相流参数检测技术的国内外研究现状,第2~5章介绍了电导法油气水多相流持水率和流量测量技术,第6~8章介绍了光纤探针油气水多相流持气率测量技术,第9~12章介绍了电磁法油气水多相流流量测量技术。

本书可供从事油田测井、物联网行业的广大技术人员阅读参考,也可作为研究生和高年级本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

生产测井油气水多相流测量方法与传感技术研究/孔令富,刘兴斌,李英伟著. —北京:科学出版社,2017.3

ISBN 978-7-03-052050-0

I. ①生… II. ①孔… ②刘… ③李… III. ①油气田—生产测井—测量方法—研究 IV. ①TE151

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第047632号

责任编辑:任 静 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本:720×1 000 1/6

2017年3月第一次印刷 印张:17

字数:326 000

定价:105.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

相的概念是指流动系统中具有相同成分和物理化学性质的均匀物质部分，各相之间有明显可分的界面，当流体中同时存在不同相成分时就形成了多相流。在石油、化工、冶金、电力等行业中普遍存在多相流问题，并对多相流的计量及控制提出了非常高的要求，发展多相流检测技术是现代工业发展的迫切需要。在石油工业中，对石油和天然气从地下储层到地面处理设备的整个系统来说，多相流动贯穿其生产过程的始终；管道内的流体一般为油水两相流或油气水三相流，其流动形式可能是垂直流、水平流或倾斜流。中国多数油田为陆相沉积，具有低孔、低渗和多层系等特点，由于长期注水开发，油井产液含水率不断上升。以大庆油田为例，目前正在生产的油井约四万余口，2007 年其主力油田的综合含水率已达 91%。由于综合含水率的增长将严重影响油田的可持续发展，因此在这种情况下，必须对油井进行动态监测，即测量油井中多相流体的流动参数，及时了解和掌握各产层的生产状况，以对地下储层进行压裂或堵水，合理调整油井的开发方案，使油井处于正常或最佳生产状况，最终达到提高油井开发效率和提高原油采收率的目的，并延长油田开采寿命。

随着我国各大油田纷纷进入中晚期开发阶段，多数油井由自喷转向机械采油。根据抽油机井工艺要求，测井仪器只能通过油管 and 套管之间的环形空间进入需要测试的目的层，此时要求仪器的最大外径不能超过 28mm。苛刻的井下条件使大多数在地面上应用得非常成熟的流量和流体组分测量技术难以直接推广到油井井下，给井下仪器的传感器、电路及其他辅助装置设计都带来了极大困难。另外，油井井内温度和压力较高且变化范围较大，温度从几十摄氏度变化到上百摄氏度，压力从几兆帕变化到几十兆帕，要求测井仪器必须耐高温、耐高压；而且此时油、气、水的物性参数也会沿井深变化，导致油井内多相流体的流动状态复杂多变，进一步加大了测量难度。对抽油机井来说，其井内流体总流量会随着抽油机的冲次呈规律变化，即上冲次流量增大、下冲次流量减小；含水率也是随着冲次变化的，且其变化规律要复杂得多，与地层的供液能力、抽油泵的抽吸能力、油水的比重和黏度等因素有关；致使井下油水多相流体参数检测的难度很大。尽管目前国内外学者做了大量的研究工作，但迄今为止商品化的多相流工业仪表为数很少，油井多相流参数检测技术仍是一个亟待发展和探索研究的领域。

自 2000 年开始，燕山大学孔令富课题组受大庆油田有限责任公司委托，进行油气水多相流参数检测设备开发，目前已成功研制集流型电导式持水率测井仪、集流

型电导式相关流速测井仪、集流型蓝宝石光纤探针持气率测井仪，小管径电磁流量测井仪、电磁相关流量测井仪，形成并完善了油田产出剖面测井技术系列。这些设备较好地解决了中国陆上高含水油田测井难题，目前已在大庆油田大规模推广应用，成为产液剖面测井的主导技术。本书正是课题组 15 年来工作成果的总结，详细介绍了油田生产测井油气水多相流电导测量技术、光纤测量技术和电磁测量技术。全书共 12 章，第 1 章介绍了油气水多相流参数检测技术的国内外研究现状，第 2~5 章介绍了电导法油气水多相流持水率和流量测量技术，第 6~8 章介绍了光纤探针油气水多相流持气率测量技术，第 9~12 章介绍了电磁法油气水多相流流量测量技术。

本书撰写由孔令富、刘兴斌和李英伟共同完成，全书由大庆油田有限责任公司副总工程师谢荣华主审。孔令富老师的博士研究生王月明和杜胜雪参与了本书第 9~12 章内容的撰写。另外，在本书编写过程中，得到了大庆油田有限责任公司测试技术服务分公司蔡兵主任、李凯峰高工、胡金海高工、张玉辉高工、黄春辉高工、王延军高工，燕山大学信息科学与工程学院练秋生教授、胡正平教授、李林副教授、于莉娜高级实验师的大力支持和帮助，在此向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免会有疏漏和不妥之处，恳请广大读者给予批评指正。

目 录

前言

第 1 章 油气水多相流参数检测技术概述	1
1.1 电导传感器多相流测量技术研究现状	1
1.1.1 多探针电导传感器	2
1.1.2 截面多极电导传感器	2
1.1.3 纵向多极电导传感器	3
1.2 油气水三相流持气率测量技术研究现状	3
1.2.1 非光学传感持气率测量技术	3
1.2.2 光纤传感器持气率测量技术	4
1.3 电磁流量测量技术研究现状	5
1.3.1 电磁传感器建模仿真及结构优化技术	5
1.3.2 电磁流量计在油田生产测井中的应用	6
1.4 相关流量测量技术研究现状	7
1.4.1 相关测量技术在多相流流量测量中的应用	7
1.4.2 电磁传感与相关技术结合的流量测量方法	7
参考文献	8
第 2 章 电导传感器敏感场理论分析	15
2.1 电导传感器测量原理	15
2.1.1 电导法持水率测量原理	16
2.1.2 相关法流速测量原理	16
2.2 均匀介质时电导传感器内部敏感场分布	17
2.2.1 传感器内部敏感场分布理论模型	18
2.2.2 理想情况下传感器内部敏感场分布	20
2.2.3 激励电流漏失情况下传感器内部敏感场分布	23
2.3 非均匀介质时电导传感器输出响应特性	25
2.3.1 传感器对单个柱状油泡的响应特性	25
2.3.2 传感器对多个球状油泡的响应特性	28
2.3.3 环状流型下传感器的响应特性	32
参考文献	34

第3章 电导传感器结构参数优化设计	36
3.1 电导传感器敏感特性分析	36
3.1.1 电导传感器有限元模型	36
3.1.2 电导传感器空间灵敏度分布	38
3.1.3 电导传感器空间滤波特性	40
3.1.4 电导传感器频率响应特性	42
3.2 激励屏蔽持水率测量电导传感器优化设计	44
3.2.1 屏蔽电极可行性理论分析	45
3.2.2 激励电极和测量电极结构优化	49
3.2.3 屏蔽电极结构优化	51
3.3 阵列相关流速测量电导传感器优化设计	53
3.3.1 阵列相关电导传感器结构设计	53
3.3.2 阵列相关电导传感器结构优化	55
参考文献	56
第4章 电导式持水率与流速测量仪研制	57
4.1 电导式持水率测量仪研制	57
4.1.1 系统硬件设计	58
4.1.2 系统软件设计	65
4.2 电导式流速测量仪研制	70
4.2.1 系统硬件设计	70
4.2.2 系统软件设计	80
参考文献	86
第5章 电导式持水率与流速测量仪实验结果分析	87
5.1 电导式持水率测量仪实验结果分析	87
5.1.1 室内实验结果分析	87
5.1.2 油水两相动态实验结果分析	89
5.1.3 油田现场试验	93
5.2 电导式流速测量仪实验结果分析	98
5.2.1 室内实验结果分析	98
5.2.2 油水两相动态实验结果分析	100
5.2.3 油田现场试验	103
参考文献	110
第6章 光纤探针持气率测量基本理论与优化技术	111
6.1 光纤探针相态检测工作原理	111

6.2	光纤探针敏感头材质优化设计	114
6.3	光纤探针敏感头形状优化设计	116
6.3.1	敏感头形状优化基本原理	116
6.3.2	敏感头形状优化方法实现	120
6.4	光纤探针敏感头锥角优化设计	123
6.4.1	敏感头灵敏区域仿真分析	124
6.4.2	敏感头对流体流动影响分析	128
6.5	光纤探针光路系统优化设计	130
6.5.1	耦合光路优化设计	131
6.5.2	光源光路优化设计	135
	参考文献	137
第 7 章	光纤探针响应特性分析与阵列结构优化设计	138
7.1	光纤探针响应特性分析	138
7.1.1	气泡在油气水三相流中的存在形式	138
7.1.2	探针垂直刺穿气泡中心位置时的响应特性	140
7.1.3	探针垂直刺穿气泡不同位置时的响应特性	141
7.1.4	探针倾斜刺穿气泡不同角度时的响应特性	143
7.2	阵列光纤探针结构优化设计	144
7.2.1	阵列光纤探针结构设计	145
7.2.2	油气水三相流含气率分布仿真分析	146
7.2.3	阵列光纤探针结构优化实现	151
	参考文献	155
第 8 章	光纤探针持气率测量仪研制与实验结果分析	156
8.1	光纤探针持气率测量仪整体结构设计	156
8.2	光纤探针持气率测量仪控制系统设计	157
8.2.1	控制系统整体设计思想	158
8.2.2	信号放大和 A/D 转换模块设计	160
8.2.3	PIC 单片机 Manchester 码编码模块设计	162
8.2.4	差分功率放大和电源供电模块设计	166
8.3	光纤探针持气率测量仪实验结果分析	167
8.3.1	室内实验结果分析	167
8.3.2	动态实验结果分析	169
8.3.3	油田现场试验结果分析	172
	参考文献	177

第 9 章	电磁法流量测量基本原理与权重函数分析	178
9.1	电磁法流量测量基本原理	178
9.1.1	电磁法流量测量传感理论	178
9.1.2	电磁相关法流量测量原理	180
9.1.3	多对电极电磁相关法流量测量原理	182
9.2	电磁法流量测量权重函数分析	184
9.2.1	权重函数与虚电流	184
9.2.2	单对电极径向权重函数分析	186
9.2.3	多对电极径向权重函数分析	191
	参考文献	195
第 10 章	电磁传感器磁场分布与响应特性分析	197
10.1	电磁传感器磁场分布	197
10.1.1	矩形励磁线圈磁场分布	197
10.1.2	马鞍形励磁线圈磁场分布	201
10.2	电磁传感器响应特性分析	205
10.2.1	单对电极电磁传感器响应特性分析	206
10.2.2	多对电极电磁传感器响应特性分析	211
	参考文献	212
第 11 章	电磁传感器结构参数优化设计	214
11.1	小管径电磁传感器励磁结构优化	214
11.1.1	小管径电磁传感器励磁结构模型	214
11.1.2	螺线管线圈、磁芯参数优化设计	216
11.1.3	螺线管线圈相距距离优化设计	219
11.2	电磁相关传感器结构优化设计	220
11.2.1	励磁线圈轴向长度优化设计	221
11.2.2	上下游检测电极间距优化设计	227
11.2.3	多对电极电磁法传感器电极数目优化	231
	参考文献	233
第 12 章	电磁法流量测量仪研制与实验结果分析	234
12.1	油井下小管径电磁法流量测量仪研制	234
12.2	电磁法流量测量仪驱动电路设计	237
12.2.1	电磁流量计励磁驱动电路设计	239
12.2.2	电磁流量计信号处理电路设计	241

12.3 动态实验及结果分析	249
12.3.1 垂直单相水流流量测量实验结果	250
12.3.2 垂直油水两相流流量测量实验结果	252
12.4 油田现场试验结果分析	254
参考文献	259

第1章 油气水多相流参数检测技术概述

多相流为具有两种或两种以上不同“相”物质混合在一起同时流动的流体。目前，在化工、石油、冶金、环保和轻工等行业许多生产场合与设备中涉及的多相流流动工况十分普遍，多相流涉及范围的广泛性及其性能研究的重要性推动了多相流技术研究工作的深入开展^[1]。多相流流体体系情况极其复杂，要理解现象，获得概念，建立模型并进行过程的预测、设计和控制，首先要解决的就是多相流的检测技术问题。多相流流动是一种复杂的多变量随机流动过程，因此多相流被称为“难测流体”^[2]。多相流测量的对象主要包括流体的流量、分相含率等技术参数，随着生产要求的提高，检测所涉及多相流的各种技术参数将对进一步改善相应生产过程的质量和各项性能指标具有重要意义^[3]。正因如此，目前对于多相流参数检测技术的研究已成为国内外科技人员竞相探索的热点课题^[4,5]。

石油是当今世界上最为重要的能源之一，石油工业的发展关系到其他工业现代化的进程^[6]。油气水多相流流动就是石油工业中一种非常典型的多相流，本书研究生产测井中的油气水多相流主要以油气水三相流为主体的多相流流体，这里的油相是指油井产出液中的液烃相，气相是指天然气、轻烃、非轻烃气体，水相是指含有极少量固相物质（如砂、铁、镍等）的矿化水^[7]，在石油合理开采过程中需要随时监控每口油井的生产动态，其目的就是要对油井产出液及各分相流量、含率进行连续地计量进而提供地层油气含量，监测油井和油藏动态特性等反映石油生产状况的各种信息，以保证优化生产和稳定生产。油气水多相流参数检测技术是石油产出剖面测井应用最广泛的一种，也是测井工业中最热门的课题之一^[8]。

1.1 电导传感器多相流测量技术研究现状

由于多相流体各相之间通常具有不同的电学特性，据此人们设计出了大量基于电学敏感特性的电导传感器。其中，非侵入式电导传感器一般用于对流体的空间平均分布特性进行测量，如流体的空隙率；局部插入式电导传感器通常用于测量流体的局部特征量，包括环状流的液膜厚度、泡状流分散相泡径尺寸等；集流插入式电导传感器适用于流体流速较低的情况，通过采用集流的方法来减少各相之间滑脱速度对测量结果的影响，可以较精确地测量泡状流分散相含率及流体流动速度等参数。本节主要根据电导传感器中敏感电极的具体实现形式，将其划分为多探针电导传感

器、截面多极电导传感器和纵向多极电导传感器；除此之外，还有半圆环电极传感器^[9,10]、平板电极传感器^[11]和截面圆环电极传感器^[12]。

1.1.1 多探针电导传感器

多探针电导传感器广泛应用于气液两相流局部流动速度和局部分相含率的测量中，其检测的实质是令待测气泡与作为检测元件的探针发生碰撞，从而使探针输出一系列反映气泡大小的电脉冲信号。Lucas 等^[13]使用双探针电导传感器对气液两相流的含气率进行了测量，并通过记录气泡到达两个探针间的时间差，近似估算出了流体的速度剖面。Takamasa 等^[14]使用双探针电导传感器对小直径管道内泡状流型的转换界面进行了研究。Kim 等^[15]对小型四探针电导传感器结构进行优化，以精确测量各种两相泡流的局部参数。Jeong 等^[16]使用四探针电导传感器对气水两相流进行测量，得到了泡状流型、段塞流型和乳沫流型间的转换界面。Mishra 等^[17]和 Lucas 等^[18]使用一种正交四探针传感器对气液两相流的局部气相速度进行了测量，并根据电导探针的输出信号提出了新的测量模型。Panagiotopoulos 等^[19]采用旋转双探针的方法模拟了四探针的测量效果，为多探针传感器结构设计提供了一条新途径。探针法的主要缺点是只能对流体局部信息进行测量，且结果受两相流流型影响大。

1.1.2 截面多极电导传感器

截面多极电导传感器主要用于电阻层析成像（electrical resistance tomography, ERT）技术中，以对流场的电阻信息进行检测。ERT 技术的物理基础是：不同的介质具有不同的电导率，判断出敏感场中的电导率分布就可知道流场中介质分布的实际情况。使用 ERT 技术的前提是流场中的离散相介质的电导率很小，而连续相介质的电导率却很高，以使敏感场内的电流有绕过离散相的趋势，此时测量数据能够反映敏感场内介质的分布情况；目前该技术的主要缺点是传感器结构复杂、工艺实现困难，且运算数据量大，不利于两相流的在线实时测量。

Tan 等^[20]在圆形管道内表面平滑镶嵌 16 片金属电极，组成截面 16 电极电导传感器；采用 20kHz 交流电流源对各电极进行交替旋转激励，以在管道截面上产生交替变换的电场，通过旋转扫描测量其他电极上的电压数据，得到流场中电阻率的分布信息；之后在测量数据中直接提取流体流动特征量，实现气液两相流流型的辨识。刘铁军等^[21]采用双极性脉冲电流源来驱动截面 16 电极电导传感器，避免了直流激励下的介质电极化现象，实现了每秒 30 帧的实时成像。Razzak 等^[22]在垂直管道内轴向一定距离处各安装 8 片金属电极，组成双面 8 电极电导传感器，通过计算上下游传感器输出信号的互相关函数，得到了气液固三相流中非导电相的传播速度。最近，Pakzad 等^[23]采用四面 16 电极电导传感器对三维流场进行了测量。

1.1.3 纵向多极电导传感器

由于环形电极具有安装方便、实现简单的优点,近年来得到了广泛应用。Lucas等^[24]在微型绝缘探棒上镶嵌六个微小环形电极,构成外流式局部电导传感器,对液固两相流体进行了测量。Fossa等^[25]采用内流式环形电导传感器对气液两相水平间歇流进行了测量,并讨论了电极结构尺寸对流体平均空隙率测量结果的影响。最近,Fossa等^[26]又采用轴向排列的四组环形电导传感器对液固流化床中液相和固相的分布进行了测量。

针对油水两相流测量问题,Jin等^[27]提出一种非集流纵向多极阵列电导传感器,其由八个环形电极组成;其中,E1-E2为激励电极,C1-C2为上游相关电极,C3-C4为下游相关电极,H1-H2为含水率测量电极;在激励电极的作用下,各测量电极敏感于传感器内部流体的分布信息;采用有限元法对相含率测量电极和相关流速测量电极进行了优化,但由于其传感器内径为125mm,在油井井下应用时遇到困难。为满足机采油井实际测量的需要,胡金海等^[28-31]提出一种外径仅为28mm且能同时测量油水两相流流量和含水率的集流型6电极电导式传感器,并在大庆油田产液剖面测井中得到了广泛应用;刘兴斌^[32]采用数学物理方法求解了传感器内部的敏感场分布,确定了测量电极的放置范围;但是目前对该传感器的响应特性、空间灵敏度特性和空间滤波特性均缺乏深入考察,阵列电极的几何结构和空间排列还有待进一步研究。

1.2 油气水三相流持气率测量技术研究现状

由于油气水三相流本身流动的复杂性,无法用理论方法直接推导出流体的持气率,目前获取多相流持气率的有效手段是实验测量,常用的测量方法有快关阀门法、压差密度法、层析成像法、高速摄像技术、射线衰减法、超声波法、微波法、电容法、电导法及光纤探针法等^[33-35]。

1.2.1 非光学传感持气率测量技术

快关阀门法作为目前多相流持气率测量的常用方法之一,Colombo等^[36]和Wang等^[37]将快关阀门方法应用于气液两相流测量中,该方法是对测量油气水三相流动管内截面平均持气率的有效方法,当油气水三相流在管内的流动达到稳定时,快速、同步关闭测量试验管段两端的两个阀门,通过一定时间的静态气液分离,便可求出油气水三相流测量管内两阀门间的平均体积含气率,该方法容易操作、准确性高、可重复试验,但无法实现对油井井下测量管内截面持气率的在线实时测量,所以运用于实际工程中具有一定的局限性。层析成像法^[38]是一种新型的工业过程检测技

术,利用油气水各相不同的介电常数和含量,得到不同等价介电常数,将测量得到的信息进行图像重建来测得各相含量,缺点是系统的实时性、测量精度和图像质量比较差,工业应用有一定局限。高速摄影技术^[39]具有分辨率高、信息量采集大、不干扰井下流体的优势,测量结果经过计算机处理后用图像的形式表现出来,但是井下流体为多种物质混合,具有不透明性,这限制了高速摄影法的使用。 γ 射线衰减法^[40]是一种新型的工业过程检测技术,根据康普顿散射理论以非接触的形式测量油气水三相流中的含气率等参数,这种方法具有不干扰、测量精度较高、稳定性好的特点,缺点是存在射线辐射、造价高、使用和维修困难。微波法^[41]应用于油气水三相流检测中,主要基于不同相态对微波能量吸收级别不同,具有非侵入性,但微波传感器不太适用于复杂环境,且造价高。

电导探针法测量持气率原理是基于液相与气相导电率不同这一特性。当很细电导探针敏感区插入气液两相混合物中时,若探针的接触面落在气相中,探针经测量电路后输出一高电平信号;若落在液相中,则输出一低电平信号。管内流体中某点的持气率实际上就是该点在任意时刻出现气相的概率,因此,电导探针法测得的持气率只是局部某点的时间平均持气率。Ceccio 等^[42]采用单头电导探针测量两相流的局部空隙率和气泡频率;Bloch 等^[43]将电导探针应用于大直径气泡塔中,以对其含气量进行测量;孙科霞等^[44]采用双头电导探针在单头性能基础上还可测量气泡速度、气泡尺寸、界面浓度等局部统计参数。但影响电导探针法测量精度主要有响应滞后、气泡变形等因素,且该方法测量误差较大、传感器易腐蚀、使用寿命周期短,其综合性能较差。

1.2.2 光纤传感器持气率测量技术

光纤传感技术是近几十年来迅速兴起的一种新型监测技术。光纤传感器是近几年正在研发的新型传感器,它可集信息“传”与“感”于一体,与传统传感器相比具有如防爆、抗电磁干扰、电绝缘性好、耐腐蚀、耐高温高压、体积小、重量轻、灵活方便、灵敏度高等优点^[45,46],特别适用于恶劣环境下。针对传统的电子传感器无法运用于井下如高温高压、腐蚀、狭小空间等恶劣环境下的工作缺陷,进一步展出光纤探针测量法。光纤探针法的测量原理基于气相和液相对光的折射率不同,当光入射到两种介质分界面上的时候,分成两部分:一部分反射回原来介质(假定介质的折射率为 n_1),另一部分折射入另一介质(假定介质的折射率为 n_2)。它们之间的相对强度取决于两种介质的折射率。对于油气水三相流体而言,由于三种介质光学折射率差异较大,因而多相流体折射率会随着各相比比例改变而发生变化^[47,48]。当光纤探针敏感探头接触为气相时,光在光纤探针敏感探头上产生反射现象;当光纤探针敏感探头接触水或油相时,光经敏感探头被折射入水或油相中。随着流体动态变化通过检测经敏感探头反射回接收端光线强度变化而产生高低电信号来分辨光

纤探针敏感探头是处于气相还是液相,从而根据产生的连续变化的电压信号测量局部截面持气率。

目前国内外有很多学者采用光纤探针法对多相流进行测量,幸莫川等^[49]用光纤探针法得出了倾斜管两相泡状流的空泡份额与斜角的关系;刘国强等^[50]采用双头光纤探针对内径为 50mm 竖直圆管内空气-水两相泡状流界面参数径向分布特性进行了实验研究。Mena 等^[51]采用光纤探针对气液固三相流进行测量,以分析气泡的流动状态;Pjontek 等^[52]和 Higuchi 等^[53]将光纤探针应用于大直径气泡塔中,以对其含气量进行测量;Sakamoto 等^[54]采用光纤探针对气液两相流进行测量,研究了探针输出信号的处理算法,提高了持气率估计的精度;但是这些光纤探针的尺寸较大,且均采用全光纤传输,不适合国内油井井下生产测井使用。孔令富、李英伟等^[55-57]研制了一种适合油井井下应用的蓝宝石光纤探针,并应用到冀东油田、大庆油田进行油气水三相流持气率测量;该光纤探针解决了传统光纤传感器在油井井下应用时存在的易粘油、易腐蚀、响应幅度低、易受噪声干扰等缺点,其持气率测量精度较高,可以满足油田现场应用的要求。

1.3 电磁流量测量技术研究现状

电磁流量计^[58]是基于电磁感应定律来测量导电性流体体积流量的仪表,其由核心部件电磁传感器辅以相应的外围电路和其他模块组成。电磁流量计宏观上把流体流动看成是导体做切割磁力线运动,其可在层流、紊流、脉动流以及产生流线振动等情况下对单相流体的流量进行准确测量^[59]。由于电磁流量计管道内部光滑无阻流部件,其不会干扰流体流动,不会产生压力损失,且测量结果与被测流体的温度、黏度、压力等物理参数没有关系^[60],因此在钢铁冶金、石油化工、农业灌溉、城市给排水等领域电磁流量计都有着广泛的应用。

1.3.1 电磁传感器建模仿真及结构优化技术

研究人员不断采用各种方法对电磁传感器励磁部件进行建模仿真,并探索其结构优化方法^[61]。乔旭彤等^[62]采用有限元计算方法,在三维情况下就不同轴向长度线圈所产生的激励磁场的平行程度作分析和比较,提出了判别激励磁场平行程度的指标。胡亮等^[63]利用电磁传感器磁场的交变特性,通过测量电磁感应所产生的其他物理量间接获取电磁传感器有效区域内的磁场信息,从而实现了电磁流量计的干标定。邬惠峰等^[64]利用有限元方法建立了电磁传感器场路耦合模型,根据有限元数值分析功能求解感应电势信号,模拟了电磁流量计的动态性能。金宁德等^[65]分析了电磁传感器的磁场分布特性,研究了仪器偏心及流体磁导率变化等因素对磁场分布的影响,在此基础上,重点考察了流速剖面分布与传感器输出响应特性之间的关系。赵琛等^[66,67]

对电磁传感器不同线圈形状进行了仿真,根据矩形线圈的磁场计算方法,延伸出了鞍状线圈的近似模型,并对其权重函数进行了求解。Cao 等^[68]对电磁传感器线圈形状进行了优化,减小了流体流动剖面对测量结果的影响。Kong 等^[69-72]使用有限元的分析方法,建立了电磁传感器圆形、矩形和鞍状线圈的磁场模型,并对其在油水两相流下产生的感应电动势进行了仿真计算,分析了传感器的响应特性。王乐等^[73]使用 ANSYS 有限元仿真软件,得到了不同铁芯结构参数时电磁传感器内部磁场的分布,并对仿真结果进行分析、处理、权衡后给出了电磁传感器铁芯的最优结构参数。

针对两电极电磁传感器在非轴对称管流中测量精度差的问题,人们开始了多电极电磁传感器的研究。O'Sullivan^[74]提出了用于医学上血液测量的 6 电极电磁传感器,验证了在非对称流下多电极电磁传感器的信噪比和测量精度明显优于两电极电磁传感器。Horner 等^[75]通过沿管壁对多电极电磁传感器产生的感应电动势进行积分的方法,得到了非轴对称流平均流动速度的表达式。Xu 等^[76]研究了一种内含 16 个检测电极和两对励磁线圈的多电极电磁传感器,其可从多角度、多位置测量单相流体的流动速度,并推导出适合该传感器的弦端压差平均流速测量法。赵宇洋等^[77]基于区域权函数概念设计多电极电磁传感器,通过测量管道截面不同位置的弦端电压,计算各区域的轴向平均速度,实现了速度分布与体积流量的测量,提高了对单相非轴对称流和固液两相流的测量精度。张宏建等^[78]针对工业应用的特点,研制了一个 8 电极的电磁流量计,并进行了理论和实验研究,结果表明该流量计可以降低流速分布不对称对测量结果的影响,在低流速时明显地提高了测量精度。杜胜雪等^[79,80]采用有限元方法,对三对电极电磁传感器的电流密度进行数值仿真,分析比较气泡大小、形状不同时电流密度的分布情况;提出 2 个描述权重函数分布均匀度的指标,并在电极数目和位置不同情况下对权重函数的分布情况进行分析比较,对三对电极的位置进行了优化。

1.3.2 电磁流量计在油田生产测井中的应用

近年来,电磁流量计已开始应用于高含水油田注水井、注聚井的注入剖面测井中。岑大刚等^[81]研制了一种井下存储式电磁流量计,其具有启动排量小、采用普通电池供电、无机械活动部件等优点,已经用于注水井分层注水量的测量和验漏。在三次采油中,注聚合物驱油被作为提高原油采收率的一个重要手段。由于电磁流量计对注入液的密度和黏度不敏感,所以它能够较好地解决聚合物注入剖面的分层流量测量问题,并且不影响注入方式、注入状态,具有测井实效高、可靠耐用等优点,测井成功率高于 90%^[82]。

目前,大庆油田已经开展了将电磁流量计应用于产出剖面测井油水两相流流量测量的实验研究^[83,84]。垂直上升管模拟井动态实验结果表明,当油水两相流含水率高于 60%、流量高于 47m³/d 时,或当含水率高于 50%、流量高于 70m³/d 时,电磁

流量计误差小于 $\pm 5\%$ ，说明其适合于高含水高流量条件下油水两相流流量的测量。垂直自喷井现场试验结果表明，伞集流电磁流量计（通过伞集流，大大提高了流过传感器管道内流体的流速）适用于高含水油井油水两相流的流量测量，测井结果具有较好的重复性及可靠性；但在返砂严重或产气严重的高含水油井中进行测试时，仪器响应频率数据波动很大，不适合使用电磁流量计进行测试。分析原因，当流体含水率较低或含气率较大时，流体中非导电介质的含量相对较高，这些非导电介质在管道中分布的随机性导致了电磁传感器的权重函数发生变化，进而导致传感器检测电极输出信号发生波动，使得电磁流量计测量误差增加，尤其当被测流体流动速度较低时，电磁流量计测量的误差更大。因此，传统电磁流量计并不适合油井井下油气水三相流流量的测量。

1.4 相关流量测量技术研究现状

相关流量测量技术是在 20 世纪 60 年代中期发展起来的一种以互相关算法为基础的流量测量技术，其本质是通过上下游两路流体流动信号进行互相关运算，以求得流体的流动速度，进而折算出流体的体积流量。

1.4.1 相关测量技术在多相流流量测量中的应用

根据流体内部流动信号传感方式的不同，人们发展了多种不同形式的相关流量测量方法。Gurau 等^[85]采用热线风速仪对气水两相流的液相速度和气相速度进行相关测量。蒋泰毅等^[86]利用静电传感器和相关技术对气固两相流流速进行了测量。高翔等^[87]研究了基于相关技术的同位素示踪流量测量方法，并结合频谱分析进一步提高了流量测量的精度和效率。在油田生产测井中，张耀文等^[88]利用 γ 射线探测仪和相关技术进行注入剖面测井，测量注入流体的流量。刘兴斌等^[89]首次将相关技术与电导传感相结合，提出电导相关传感器，建立了其敏感场分布的理论模型，并将其应用于高含水油井流量的测量。在此基础上，赵鑫等^[90]对纵向多电极电导相关传感器的结构进行了仿真优化，Li 等^[91]采用数据融合方法对阵列式电导相关传感器输出数据进行多通道时延估计，进一步提高了油水两相流流量测量的精度。目前电导相关传感器已广泛应用于石油生产测井中，其在涡轮传感器无法测量的出砂井油水两相流流量中具有优势，但测量结果的异常点较多，且在一定程度上会受到流量测量上限的限制^[92]。谢荣华等^[93]采用热示踪相关法测量水平井油水两相流的流量，由于流体放热时间对测量精度的影响较大，所以该方法仅适合于测量低流速流体的流量。

1.4.2 电磁传感与相关技术结合的流量测量方法

由于电磁传感器可准确测量单相流体的瞬时流速，因此结合相关测量技术，可