

声波测井理论、 方法与应用

——王克协科研论文选集

伍先运 主编

石油工业出版社

声波测井理论、方法与应用

——王克协科研论文选集

伍先运 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书收录了王克协从 1979 年至今所发表的声波测井的主要科研论文 56 篇, 分为柱状双层介质中的声传播研究——声波测井理论基础、孔隙介质声学 with 井孔声 (震) 电效应研究、多极声测井与地层各向异性、声波测井信号处理与地层参数反演、套管井固井质量声学检测方法研究、非线性声学 with 声弹性——地应力预测六个部分。

本书适合石油测井专业技术人员和科研技术人员参考, 也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

声波测井理论、方法与应用: 王克协科研论文选集/

伍先运主编. —北京: 石油工业出版社, 2018.7

ISBN 978-7-5183-2696-9

I. ①声… II. ①声… III. ①声波测井-文集 IV.
①P631.8-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 133717 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里2区1号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523561

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2018年7月第1版 2018年7月第1次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张: 38.25

字数: 990千字

定价: 399.00元

(如发现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

《声波测井理论、方法与应用》
——王克协科研论文选集》
编 委 会

主 编：伍先运

委 员：（以姓氏笔画为序）

巴音贺希格 刘继生 张碧星

罗朝盛 胡恒山 崔志文 董和风

编 辑：崔志文 崔淑红

出版说明

王克协是吉林大学物理学教授、理论物理与声学专业博士生导师，20 世纪 70 年代初独立开拓井孔声学理论与孔隙介质声学科研方向，1991 年起获国务院特殊津贴，2001 年在吉林大学物理学院创建声学专业博士点，在声波测井领域做出了突出的贡献。

本文集选编了王克协教授近五十年的学术成果，共 56 篇，均为他及与其学生合作完成的。从论文内容看，王克协教授在其学术生涯中始终紧跟声波测井专业发展前沿，从声波测井理论基础研究，到孔隙介质声学与井孔声（震）电效应研究，再到多极声测井与地层各向异性研究、声波测井信号处理与地层参数反演研究、套管井固井质量声学检测方法研究、非线性声学与声弹性—地应力预测研究，在众多方面均有建树。因所收集论著源自多种学术期刊，且时间跨度大，各源刊格式标准不统一，本着尊重历史、忠于原著的原则，所用物理量单位、符号、图例、参考文献等尽量保留原文风貌，未做统一标准的处理。

诚愿以此祝贺王克协教授从事声波测井事业近半个世纪和八十寿辰。希望本文集的出版有助于广大读者更深入地了解王克协教授的学术思想和贡献，并进一步推动声波测井学科的发展。

前 言

出版本论文集主要有以下三个目的：一是纪念王克协教授在吉林大学创建声波测井研究组并从事声波测井理论、方法及应用研究近半个世纪；二是将有代表性的研究成果编辑成册，希望为从事声波测井研究的学生、学者以及相关的工作人员提供参考；三是值此王克协教授 80 寿辰之年，同学们编辑和出版此论文集以表祝贺！

1987 年，即 31 年前，我很荣幸成为王克协教授的开门弟子。在王老师的指导下，我先后完成了硕士、博士论文，毕业后又跟随他在该领域从事了 5 年的教学和科研工作。虽然我移居美国 21 年了，现在埃克森美孚石油公司任研究员，从事声波测井及测井解释的专任工作，这期间我和王老师一直保持着密切的来往，始终关注着王老师及其率领的团队科研进展情况。我即是王老师的弟子，曾经的亲历者，也是声波测井研究的同行，我认为这本论文选集不但是王克协老师及其团队从事声波测井研究的一份历史记录，而且也是一本集中了声波测井基础理论、方法与应用研究于一体系统而又完整的参考书。

王克协教授 1962 年毕业于吉林大学物理系理论物理专业，后留校任教。20 世纪 70 年代初，在吴式枢院士的倡导下，王老师从读文献开始，去探索一个完全陌生的研究领域——声波测井。虽然声波测井技术在 20 世纪 50 年代中就已经出现 [如 Humble (1955) 的单发双收声波测井仪器]，可以提供连续的地层速度，解决了地震勘探中至关重要的一个难题——即时间到深度的转换问题，但当时对声波测井的认识还相当肤浅，基础理论研究基本是空白。1967 年怀特 (J.E. White) 教授发表了第一条用计算机合成的声波测井全波曲线，填补了这方面的空白。直到 20 世纪 70 年代初，声波测井基础理论研究才引起学术界和石油界的广泛兴趣，一方面原因是因为世界对能源的需求不断增长，导致对石油勘探与开发技术投入的增加；另一方面的原因是，新型的双发双收井孔补偿声波测井仪在 20 世纪 70 年代问世，所采集的声波数据质量大大提高，声波不仅能被应用在地震勘探上，而且也开始被应用到油藏描述即储层孔隙度的测定、套管井固井质量评估等与油田开发、生产直接相关的领域上。那时在吉林大学开展声波测井研究无疑是一个挑战，因为没有任何先前的研究基础，是一片学术处女地亟待开拓。王老师等利用两年的时间，完成编写了《声法测井的物理基础》三本讲义，包括声换能器数学描述、柱状地层井孔声场求解等。1976 年成功地为石油系统举办了国内最早、最系统的声波测井物理基础培训班。虽然讲义没有正式出版，但后来被许多国内同行索要、借阅、引用，为国内早期声波测井技术普及和发展做出贡献。1979 年王克协和董庆德等发表了在声波测井方面的第一篇论文《柱状双层准弹性介质中声辐射场的理论分析》，这是继怀特 (J.E. White) 之后最完整的全波计算工作，也是我国最早的声波测井全波理论模拟论文，此文比后来被大量引用的 1981 年郑传汉 (C.H. Cheng) 的工作还早两年。可惜这篇文章发表在吉林大学学报上，没能及时被国内外读者注意到。1985 年董庆德和王克协发表了《柱状多层准弹性介质声压波形的数值计算与分析》，是针对套管井声波全波测井的数值研究。1986 年又发表了《渗透性地层油井中声场的理论分析与计算》，此文将 Biot 孔隙介质声学理论与井

孔条件相结合,旨在用声波测井来获取储层信息如孔隙度、渗透率等。这些早期工作的完成大大地缩短了国内声波测井研究与国外的差距,也为吉林大学声波测井研究后来的发展奠定了坚实的理论基础。

吉林大学声波测井研究的第二阶段,始于王老师 1987 年底从美国进修归来。王老师自 1985 年至 1987 年赴美,先后在德雷塞尔大学(Drexel University)和科罗拉多矿业学院(Colorado School of Mines)访学,前一段从事核结构理论方面的研究,后一段师从美国工程院院士怀特(J.E. White)教授进行孔隙介质本构模型理论与井孔声散射研究。虽然与怀特先生合作的时间不长,但正是那样一段经历坚定了王老师回国后完全转向声波测井研究的决心。20 世纪 80 年代,国际上声波测井技术发生了划时代的变化:第一台数字化单极全波阵列测井仪于 1984 年问世,声模拟信号在井下被数字化,然后被毫无干扰地通过测井电缆传到地面。这种仪器不仅可以记录纵波,而且还能记录到横波(在快地层下)、伪瑞利波(Pseudo Rayleigh)和斯通利(Stoneley)波,这些数据可以永久地保存在磁盘上,在数据中心被进一步处理、分析和利用。仅隔大约 6 年之后,更新一代的全波多极(单极、偶极和交叉偶极)阵列声波测井仪也相继推出。一时间大量的全波列数据被采集,由于缺少理论基础,人们不知道如何挖掘实际采集数据的价值,于是迫切需要开展井孔声波传播机理及应用的研究。在石油工业界的资助下,世界著名大学麻省理工学院(MIT)于 1983 年创办的“井孔声学及测井”联合研究项目(The Borehole Acoustics and Logging Consortium)也正是在这种情况下应运而生。王老师与合作者董庆德老师及时抓住机遇,在连续两轮获得国家自然科学基金资助基础上,多方面创造条件,1987 年开始指导该方向的硕士研究生,拓宽研究方向,积极参与国内地球物理领域的学术交流,扩大在同行里的影响。1990 年吉林大学物理学开始招收该方向的博士研究生,研究队伍不断壮大。1987 年到 1997 年,王老师与他的团队一道,在国际声波测井领域普遍关注的课题上,做出了一系列基础与创新成果:通过对表示井孔 P 波首波的割线积分进行渐近展开分析,给出了同时揭示其共振与衰减特性的解析表达式,并证实了波动理论与射线理论描述的一致性,这是我至今所见到的关于 P 波首波特性的最详细的工作;通过引入泥质校正消除骨架本征衰减和反演泥浆衰减校正斯通利波衰减,发展了利用斯通利波直接反演储层渗透率的方法;通过开展多极源声测井理论和方法研究,提出了低频多极源(偶极和四极源)横波测井的物理机制,澄清了低频偶极声波测井测得的究竟是弯曲波还是折射横波的模糊认识;在此基础上,开创了用摄动方法来求解非轴对称各向异性地层井孔多极全波声场的理论和方法,解决了摄动积分法只能分析导波行为的理论困难,也为利用多极源预测地层裂纹方向提供了理论基础;通过开展竖直井孔外有水平分层地层时的井孔声场研究,证明了模式波函数构成井孔声场完备基的声场理论,同时实现了这种地层下井内外瞬态声场的有限差分数值模拟;针对超声回声水泥胶结成像测井,提出探测套管外介质波阻抗的共振透射解析反演方法,实际成像效果显著;提出了用常规声波—变密度测井识别套管井第二界面窄槽的特征波;发现了低速地层套管井弯曲波频散曲线随地层横波速度降低迅速向高频偏移的特殊现象,并被实例资料所证实;挑战传统认识,提出软地层井孔也存在临界折射横波到达的论断,其正确性已被渐近展开、数值模拟和现场实例所验证。这里仅列举几例,需更详细的了解可参考文集。

第三个阶段始于 1997 年,在王老师的主持下,吉林大学物理学院声波测井研究在课程设

置、研究生培养、纵向和横向科研项目研究、国内外学术交流等方面都有了很大的发展。2001年王老师带领声波组从理论物理专业分出来，在吉林大学物理一级学科下组织建立了声学专业。这阶段王老师已年过花甲，但又是厚积薄发、最高产的时期，教学、科研一起抓。由于声学专业的研究生课程大都不能与物理专业研究生课程共享，王老师在几年时间里相继开出六门硕、博专业课，形成了吉林大学声学专业独具特色的研究生课程体系，并亲自上课至2008年。在科研上，他与师生一道，先后又开拓了一些新的研究领域：研究了孔隙介质因动电机机制而出现的弹性波与电磁场耦合现象，开展了声电效应测井（也叫震电测井）和井孔震电散射研究；开展了随钻声波测井研究；以井周地应力测量为应用背景，开展了小应变波在有限形变介质中传播的声弹性理论研究，开展了非线性声测井与井孔声弹性理论和应用研究。这期间，培养了十余名博士生。在震电方面，发展了用势解法理论求解震电耦合方程组和对井孔震（声）电场的数值模拟，这一方法在国内外都是领先的，为声电效应测井奠定了理论基础。在非线性声测井方面，依据声弹理论实现对异常地应力的预测做出系列创新性工作，从裸眼井地应力预测，发展到套管井、地层各向异性与弹塑性，以及孔隙地层情况，这些成果对钻井井孔稳定性掌控、非常规能源的开发（水平井定位与压裂设计）、老油井套管损坏预防等生产实践，具有现实的指导意义。此期间王老师持续通过与多个石油测井单位的横向合作，对套管井声波测井理论、方法和信息处理与应用开展了系统的研究，从声幅—变密度（CBL-VDL）、超声反射波成像（UCT）、扇区水泥胶结测井（SBT），到水平井声系偏心校正和三维套后挠曲波成像（IBC），做到了从理论方法、仪器设计到实际资料处理和成像的全覆盖，形成的固井质量评价技术在油田生产实际中发挥了重要作用。这些工作实用意义更大。

本论文集主要是想反映近半个世纪王克协老师以及和他一起工作和学习过的老师和同学们在声波测井研究方面所取得的成果，由于出版篇幅的限制和内容编排上的考虑，不可能将所有发表的文章都包括进来，我们从300多篇文章中选了56篇，按研究内容侧重点的不同，分为六部分编排：第一部分是“柱状双层介质中的声传播研究——声波测井理论基础”，所列之文章集中体现声波测井组在传统声波测井方面，涵盖单极源、各向同性均匀介质（快、慢地层）探井中声场的全波及分波（纵、横波首波、导波及其Airy相等）分析方面的成果，其中也包括了利用有限差分数值方法研究更加接近实际情况的水平分层井孔中声场传播的3篇论文。第二部分是“孔隙介质声学与井孔声（震）电效应研究”，这一部分主要包括对孔隙介质声学理论、声电耦合以及孔隙介质中井孔声场的激发与传播的研究成果。第三部分是“多极声测井与地层各向异性”主要包括在多极（单极、偶极和四极）、横向各向同性介质井孔中全波及分波分析方面的成果。第四部分是“声波测井信号处理与地层参数反演”，文章集中在如何从实际测井数据中提取出地层的声学及油储参数的方法研究。第五部分是“套管井固井质量声学检测方法研究”，主要涵盖柱状多层声波测井及水泥胶结质量评价方面的成果。第六部分是“非线性声学与声弹性——地应力预测”，主要包括非线性声学、声弹效应、地应力预测方面的成果。

近五十年来王老师在科研上取得了突出的成绩，不仅得到了国内同行的广泛赞许和重视，而且也被国外同行所关注，比如渗透率的直接求取，套管井水泥胶结评价技术，地层井孔附近应力集中分析等方面，在全球上也只有屈指可数的几个学校和服务公司开展如此综合性的研究。不过对王老师作为一名老师来说，最大的成就莫过于对知识的传承和人才的培养。近

五十年来王老师一直担任着本科生和研究生的教学任务，无论事务多么繁忙，备课上课从不马虎，就是在他担任吉林大学物理系系主任期间，也没有停止给学生们上课。在开始带研究生以后，他更是把精力集中在指导学生开展学术研究上，20多年里由王老师一手带出来的硕士有30多位，博士15位！他的这些弟子们在世界各地，各行各业继续传承着他的精神。王老师不仅是一位成功的学者和导师，而且也为他的弟子们树立一个做人的榜样。他尊重学生，处处关心学生，甚至不惜牺牲他自己的利益。在每次项目结题时，王老师都把结余经费提成的绝大部分分给了学生。王老师还非常关注家庭困难的学生，给他们极大的鼓励和经济帮助，解除他们后顾之忧并全身心投入到科研中去。2007年以后，王老师先后把主持的多个项目分出子项目转给项目组骨干成员，以这种方式支持推动年轻人科研能力的快速提升。王老师那种育人不倦的理念、敏锐的物理洞察、对科学探索的激情，严谨的治学态度，特别是他那豁达的为人处事风格都给与他共处过的弟子们留下了深刻的印象和深远影响。近两年我见到他，已是年近80的人，依然思维敏捷，对讨论学术问题的兴趣一如既往，科研的脚步仍未停下，他主持的最后一个科研项目到2016年底。他是我们的导师，更是一位对我们一生产生深远影响的朋友，他熟悉、关心每位学生的身世和家庭，牵挂他们的成长和生活，几十年来，师生情、朋友情，绵远流长，历久弥新。最后，我们想用几句话来概括我们所了解的王老师：自强不息，奋斗进取，硕果累累，桃李芬芳。祝我们的恩师生日快乐，健康长寿！也趁此机会向在背后默默支持王老师、一直热心关怀和鼓励学生们的师母骆秀云老师表示由衷的感谢。

伍先运

2018年3月于美国休斯敦

(伍先运博士现在美国埃克森美孚石油公司研究中心工作，是声波测井和测井解释专家)

目 录

第一部分 柱状双层介质中的声传播研究——声波测井理论基础

柱状双层准弹性介质中声辐射场的理论分析——声法测井理论研究 (I)

.....	王克协 董庆德 王爱莲 许吉庆 张关胜	(2)
钻井中首波的共振与衰减	董庆德 王克协 罗朝盛 欧维义	(11)
全波列声测井中 Airy 相的激发与利用	王克协 郭 立 董庆德	(22)
井孔声波理论研究	王克协 董庆德	(30)

Nonaxisymmetric Acoustic Field Excited by a Cylindrical Tool Placed
off a Borehole Axis and Extraction of Shear Wave

.....	Zhang Bixing Wang Kexie Dong Qingde	(37)
井孔声场计算中的黎曼叶选择	胡恒山 马 俊 王克协	(52)
用频率一波数域分析研究声波测井全波列的各波相	刘继生 王克协	(57)
超长源距声反射波测井数值模拟与远井界面成像	宋立军 马 俊 王克协	(62)

SH Wavefields in Cylindrical Double-layered Elastic Media Excited by a Shear
Stress Source Applied to a Borehole Wall

.....	Yao Guijin	Wang Kexie	Ma Jun	J.E.White	(67)
Numerical Simulation and Field Examples of Critically Refracted Shear					
Arrivals in a Borehole in Soft Formations					Wang Kexie (78)
Asymptotic Analysis of Vertical Branch-Cut Integral of Shear Waves in a					

Fluid-Filled Borehole Utilizing the Steepest-Descent Method		
.....	Yao Guijin Song Ruolong Wang Kexie	(84)
弹性固体地层—流体井孔弹性波场的有限差分数值模拟.....	董和风 王克协	(90)
水平薄层包围的流体井孔中声波场的数值模拟.....	董和风 王克协 董庆德	(101)
改进的 PV-FD 方法与沿井孔传播声波通过层的精细描述		

.....	马 俊 董和风 王克协	(108)
-------	-------------	-------

第二部分 孔隙介质声学及井孔声 (震) 电效应研究

渗透性地层油井中声场的理论分析与计算.....	王克协	董庆德	(114)
含孔隙层多层地震波场的矩阵算法及数值计算.....	伍先运	李幼铭	王克协 (123)
Biot 介质中 P 波与井孔的耦合	王克协	J. E. White	伍先运 (134)
Waves in a Gel-saturated Porous Solid	J. E. White	Wang Kexie	(143)
孔隙介质声学理论中的动态渗透率	胡恒山	王克协	(152)
无限 Biot 双相介质中水平流体层声波场的分波与全波数值分析			

.....	巴音贺希格 马 俊 张 维 王克协	(158)
Elastic Waves in non-Newtonian (Maxwell) Fluid-saturated Porous Media		
.....	Cui Zhiwen Liu Jinxia Wang Kexie	(170)

The Application of the Nonsplitting Perfectly Matched Layer in Numerical

Modeling of Wave Propagation in Poroelastic Media

..... Song Ruolong Ma Jun Wang Kexie (183)

A Discussion on the Formula Construction of the BISQ Model

..... Cui Zhiwen Wang Kexie (193)

井孔周围轴对称声电耦合波: 理论 (I) 胡恒山 王克协 (198)

井孔周围轴对称声电耦合波: 声电效应测井数值模拟 (II) 胡恒山 王克协 (206)

声电效应测井模型实验研究 胡恒山 李长文 王克协 朱正亚 (220)

Seismoelectric Waves in a Borehole Excited by an External Explosive Source

..... Zhou Jiuguang Cui Zhiwen Lv Weiguo Zhang Yujun Wang Kexie (228)

双声源激发随钻测井声电耦合波理论模拟

..... 丁浩然 崔志文 吕伟国 刘金霞 王克协 (238)

第三部分 多极声测井与地层各向异性

Multipole Sources in a Fluid-filled Borehole Surrounded by a Transversely

Isotropic Elastic Solid Zhang Bixing Dong Hefeng Wang Kexie (250)

双相介质井孔多极源声测井理论及分波分析与全波计算

..... 张碧星 王克协 董庆德 (264)

Acoustic Multipole Logging in Transversely Isotropic Two-phase Medium

..... Zhang Bixing Wang Kexie Dong Qingde (277)

Theoretical Study of Perturbation Method for Acoustic Multipole Logging in

Anisotropic Formation Zhang Bixing Wang Kexie (292)

各向异性双相介质中多极源声波测井理论研究 张碧星 王克协 (311)

声波测井新理论和方法进展 王克协 崔志文 (323)

横向各向同性地层斜井中正交偶极子激发声场的数值模拟

..... 阎守国 宋若龙 吕伟国 马俊 王克协 (336)

横向各向同性地层 (VTI) 井孔声弹效应对弯曲波的影响

..... 刘金霞 崔志文 李刚 吕伟国 王克协 (345)

Full Waveform Investigation of a Perturbation Method for Acoustical Multipole

Logging in Transversely Isotropic Medium

..... Zhang L. Wang K. X. Zhang B. X. Wang X. T. (354)

第四部分 声波测井信号处理与地层参数反演

利用斯通利波速度反演地层横波速度的方法与应用研究

..... 伍先运 余仕成 王克协 (364)

利用井孔首波求取 v_s 和 Q_s 值的广义线性反演方法的应用研究

..... 周士弘 王克协 马俊 刘勇 (371)

利用声全波测井资料求取储层渗透率的方法与应用研究

..... 伍先运 王克协 郭立 余仕成 董庆德 (381)

Determination of Permeability from Flexural Waves in Dipole Acoustic Logging

..... Wang Kexie Ma Jun Wu Xianyun Zhang Bixing (388)

三种阵列声波测井数据频散分析方法的应用与比较

..... 曹正良 王克协 谢荣华 马在田 (394)

Theoretical Study on Inversing the Anisotropic Permeability of VTI Two-phase Media by Flexural Waves in a Fluid-filled Borehole
..... Xie Fuli Lv Weiguo Yan Shouguo Wang Kexie Zhang Bixing (405)

第五部分 套管井固井质量声学检测方法研究

柱状多层准弹性介质中声压波形的数值计算与分析——声法测井理论研究（II）
..... 董庆德 王克协 许吉庆 (428)

偶极子横波测井中井况变化对井内声场影响的理论分析
..... 刘继生 王克协 (436)

超声反射法套管——地层环空间介质波阻抗反演方法与成像实例
..... 姚桂锦 王克协 伍先运 强毓明 (440)

Numerical simulation of Sector Bond Log and Improved Cement Bond Image
..... Song Ruolong Liu Jinxia Hou Chunhui Wang Kexie (450)

Effects of Tool Eccentralization on Cement-bond-log Measurements: Numerical and Experimental Results
Song Ruolong Liu Jisheng Lv Xiumei Yang Xiutian Wang Kexie Sun Liang (464)

套管井偶极弯曲波频散向高频偏移的特性
李 刚 吕伟国 崔志文 马 俊 王克协 谢荣华 刘继生 吕秀梅 (480)

第六部分 非线性声学与声弹性——地应力预测

(2+1) 维耗散长波方程与 (2+1) 维 Broer-Kaup 方程新的类多孤子解
..... 那仁满都拉 王克协 (490)

New Explicit Exact Solutions to a Nonlinear Dispersive-dissipative Equation
..... Naranmandula Wang Ke xie (495)

Acoustoelastic Effects on Guided Waves in a Fluid-filled Pressurized Borehole in a Prestressed Formation Cao Zhengliang Wang Kexie Ma Zaitian (503)

套管井应力集中诱导井周波速各向异性的研究
..... 刘金霞 王克协 曹正良 谢荣华 刘继生 吕秀梅 (519)

套管井应力集中下正交偶极声测井的声弹理论、数值分析与实例
李 刚 王克协 刘金霞 曹正良 吕伟国 谢荣华 刘继生 吕秀梅 (526)

The Relationships Between Uniaxial Stress and Reflection Coefficients
..... Liu Jinxia Cui Zhiwen Wang Kexie (537)

Determining Maximum Shear Stress in Confined Substrate from Elastic Wave Reflection Coefficient Liu Jinxia Cui Zhiwen Wang Kexie Tribikram Kundu (550)

附录 王克协发表文章目录及指导博士学位论文目录

附录 1 王克协教授全部论著目录..... (568)

附录 2 王克协教授指导和参与指导的博士生、硕士生名单及论文题目 (585)

后记 (587)



第一部分 柱状双层介质 中的声传播研究——声波 测井理论基础

柱状双层准弹性介质中声辐射场的理论分析——声法测井理论研究 (I) ^①

王克协¹ 董庆德¹ 王爱莲¹ 许吉庆² 张关胜²

(1. 吉林大学物理系理论物理教研室; 2. 吉林油田井下采油工艺研究所)

摘 要: 本文是直接针对声法石油测井的需要提出的。假定体系为准弹性均质固体中的流体柱, 测井声系用局部表面振动的中心圆柱模拟。采用二维快速 Fourier 变换(FFT)算法, 对不同频率的声源在各种岩性下的声场进行了计算, 得到了一系列记录点的声压波形曲线。这些曲线清楚地表明有四种波群存在, 计算了它们的速度, 误差低于 4%; 同时也给出了衰减特性曲线。

计算结果表明, 物理模型是可取的, 计算方法与程序可靠, 为开展全信息测井研究提供了理论依据和有效手段。

关键词: 声波测井; 流体柱; FFT; 理论模型

Theoretical Analysis of Acoustic Radiation Field in Cylindrical Double Layer Quasielastical Media —A Theoretical Study of Acoustic Logging (I)

Wang Kexie¹ Dong Qingde¹ Wang Ailian¹ Xu Jiqing² Zhang Guansheng²

(1. Teaching and Research Group of Theoretical Physics, Department of Physics, Jilin University;

2. Institute of Underwell-trap Technology, Jilin Oil Field)

Abstract: This article is presented out of to the necessity of the acoustic logging of petroleum wells. The system is assumed to be a fluid cylinder surrounded by a uniform quasielastical solid medium and the acoustic logging tool is simulated by a central rod with local vibrating surface. The two dimension fast Fourier Transform(FFT)algorithm is adopted. Sound fields in rocks of different properties using different source frequencies are calculated and the sound pressure waveform curves on a series of recording points are obtained. These curves clearly indicate the existence of four kinds of wave groups. The error of their calculated velocities is less than 4%. The characteristic attenuation curve is also given. The results of calculation show that the physical model is acceptable and the method of calculation and the computing program are reliable and thus provide a theoretical basis and an elegant method for holographic study of oil well logging.

Keywords: acoustic logging; fluid cylinder; FFT; theoretical model

前言

声法测井是石油测井的主要方法之一。从理论上研究油井中声传播的规律, 归结为求柱状分层介质中声波场的分布。这是地声学的一项基础理论课题。弹性波在水平分层介质中的辐射与传播, 地震波理论中已有相当广泛的研究。而弹性波在柱状分层介质中的传播, 特别是有源情况下辐射声场的理论分析工作则比较少见。Somers^[1]曾研究过无限均匀固体中流体柱内环状声源的辐射声场。最近, Peterson^[2]对点源情况进行了较为系统的讨论。他们都是用围线积分的办法, 分析了近源和远源声场的渐近特性。无疑这些理论成果是有意义的, 但未给出全波列的定量结果, 难于直接与实验对比。1968年, J. E. White^[3]等结合石油测井研究了计算声测井曲线的理论方法, 算出一条声压波形曲线, 有首波显示, 但未做进一步物理分析。

为适应石油测井的需要, 我们把弹性波在柱状分层介质中辐射与传播的问题分为三种基本情况进行讨论: (1) 地层为均匀介质情况; (2) 地层为多层介质情况; (3) 地层为流体饱和和孔隙介质情况。本文只讨论均质情况, 另两种情况在进一步工作中讨论。

文中视油井为无限固体(地层)中的流体(泥浆)柱。假定地层和泥浆为有弱吸收的准弹性介质; 测井声系用局部表面振动为已知的无限长圆柱模拟; 声场用双重 Fourier 积分给出。数值计算采用二维快速 Fourier 变换算法(FFT), 先后用 ALGOL-60 和扩展 FORTRAN 语言编出两套计算声压场的程序。最后的数值计算在 CYBER-172 机上进行。

^① 本文曾刊于《吉林大学自然科学学报》1979年第2期。

一、位移场方程及其轴对称解

无限均匀介质中的流体柱（两层介质）是柱状分层介质的最简单情况。如图 1 所示，介质 I 为泥浆，介质 II 为地层。测井声系用置于泥浆中的无限长圆柱模拟，发射换能器的振动被看成是柱面上某段局部表面按已知规律振动。表示这一振动的声源振幅与波形函数是已知的。测井声系居中放置，整个体系具有轴对称性。

考虑地层为有弱损耗的准弹性介质，应力—应变关系为

$$\vec{T} = 2(\mu + j\mu') \vec{S} + (\lambda + j\lambda') e \vec{I} \quad (1)$$

此处用 j 表示虚数单位。位移场矢量为 $\vec{u} = \vec{u}(r, t)$ ，则

$$\vec{S} = \frac{1}{2}(\nabla \vec{u} + \vec{u} \nabla) \quad (2)$$

$$e = |\vec{S}| = \nabla \cdot \vec{u} \quad (3)$$

λ 、 μ 为拉梅系数； λ' ($\ll \lambda$)， μ' ($\ll \mu$) 是与内摩擦有关的参数。

在无限均匀介质中，如果不考虑体积力，位移场方程为

$$M(1 + jb)\nabla \nabla \cdot \vec{u} - \mu(1 + jd)[\nabla \times (\nabla \times \vec{u})] = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (4)$$

其中 ρ 为体密度， $M = \lambda + 2\mu$ ， $b = \frac{(\lambda' + 2\mu')}{(\lambda + 2\mu)}$ ， $d = \frac{\mu'}{\mu}$ 。

令 $\mu = \mu' = 0$ ，方程 (4) 适用于流体。

对图 1 给出的介质声系模型。当 $r = r_1$ 时，流体的径向位移应与中心柱面的已知位移一致。 $r = r_2$ 时，介质 I、II 的位移与应力应连续。如果声系表面的已知位移用

$$u(r_1, z, t) = u(z) \cdot f(t) \quad (5)$$

表示，则边界条件为

$$r = r_1 \text{ 时 } (u_r)_I = u(z) \cdot f(t) \quad (6)$$

$$r = r_2 \text{ 时 } (u_r)_I = (u_r)_{II}; (T_{rr})_I = (T_{rr})_{II}; 0 = (T_{rz})_{II} \quad (7)$$

注意到体系的轴对称性，且不考虑 SH 波激发，引入声势 ϕ ， ψ ，使

$$\vec{u} = \nabla \phi + \nabla \times (\nabla \times \vec{\psi} \vec{k}) \quad (8)$$

当 ϕ 、 ψ 满足下述波动方程时，式(4)被满足

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{\alpha^2(1 + jb)} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0; \quad \nabla^2 \psi - \frac{1}{\beta^2(1 + jd)} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

$\alpha = \sqrt{M/\rho}$ ——纵波声速， $\beta = \sqrt{\mu/\rho}$ ——横波声速。实验表明，对相当一类岩石^[4]衰减系数 $\tau(e^{-\tau x})$ 与频率一次方成比例，即 $\tau = a_p |\omega|$ 。由式(9)的平面波解可以证明（当 $b \ll 1$ ； $d \ll 1$ 时）；

$$b = 2a_p \alpha \text{SIGN}(\omega); d = a_s \beta \text{SIGN}(\omega) \quad (10)$$

a_p ， a_s 应通过岩心实验测定。

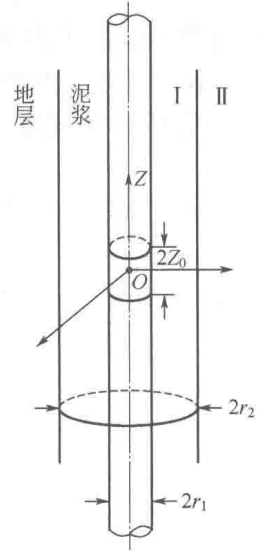


图 1 介质声系模型

进一步的求解选取圆柱坐标进行。用通常的办法不难求出波动方程符合边界条件和辐射条件的 Fourier 积分解（详见文献 [3]、[6]）。

由于接收换能器的输出电压与接收声压成比例，所以我们特别关心中心柱面上的声压分布。应用 (1) 式算出柱面上 ($r=r_1$) z 点声压（径向应力的负值）表达式

$$P(r_1, z, t) = -(T_{rr})_{r_1} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(l, \omega) U(l) F(\omega) e^{jlx} e^{j\omega t} dl d\omega \quad (11)$$

其中
$$R(l, \omega) = \frac{\omega^2 \rho_1}{m_1} \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad (12)$$

$$\Delta_1 = (m_1 \rho_2 \mathcal{K}) [I_1(m_1 r_2) K_0(m_1 r_1) + K_1(m_1 r_2) I_0(m_1 r_1)] - (\rho_1 k_{\beta_2}^4) [K_0(m_1 r_2) I_0(m_1 r_1) - I_0(m_1 r_2) K_0(m_1 r_1)] \quad (13)$$

$$\Delta = [(m_1 \rho_2 \mathcal{K}) K_1(m_1 r_2) - (\rho_1 k_{\beta_2}^4) K_0(m_1 r_2)] I_1(m_1 r_1) - [(m_1 \rho_2 \mathcal{K}) I_1(m_1 r_2) + (\rho_1 k_{\beta_2}^4) I_0(m_1 r_2)] K_1(m_1 r_1) \quad (14)$$

$$\mathcal{K} = (2l^2 - k_{\beta_2}^2)^2 \frac{K_0(m_2 r_2)}{m_2 K_1(m_2 r_2)} - 2k_{\beta_2}^2 / r_2 - 4l^2 k_2 \frac{K_0(k_2 r_2)}{K_1(k_2 r_2)} \quad (15)$$

$$U(l) = \int_{-\infty}^{\infty} u(z) e^{-j lz} dz; \quad F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j \omega t} dt \quad (16)$$

$$m_1^2 = l^2 - k_{\alpha_1}^2; \quad k_{\alpha_1}^2 = \frac{\omega^2}{\alpha_1^2} \frac{1}{(1 + j b_1)} \quad (i=1, 2) \quad (17)$$

$$k_2^2 = l^2 - k_{\beta_2}^2; \quad k_{\beta_2}^2 = \frac{\omega^3}{\beta_2^2} \frac{1}{(1 + j d_2)} \quad (18)$$

$I_0(z)$, $I_1(z)$, $K_0(z)$ 和 $K_1(z)$ 是修正 Bessel 函数。

从式(11)被积函数的结构看出，影响声压波形特点的有三个因子。其中 $R(l, \omega)$ 仅与边界形状和介质性质有关，与声源特性无关，它引起声压波形的变化反映了地层的影响，故可称其为地层滤波函数。 $U(l)$ 和 $F(\omega)$ 只由声源特性决定，是人为可以控制的因素，我们总假定它们是已知的（无论是解析形式还是离散的数据）并且绝对可积。

由于被积函数的复杂性，式(11)严格求积有困难，一般采用数值积分。可以证明，考虑了介质的弱吸收特性，对所有的实 l , ω 被积函数无奇点。从而保证了做数值积分的收敛性。不难证明 $R(l, \omega)$ 有如下对称性：

$$R(-l, \omega) = R(l, \omega); \quad R(l, -\omega) = R^*(l, \omega) \quad (19)$$

显然，这可以成倍的减少计算量。

二、二维离散 Fourier 变换与声源函数的选择

近似计算式(11)，就是用二重有限和代替二重无限积分

$$P(r_1, z, t) = \sum_{N=-\frac{N_2}{2}}^{\frac{N_2}{2}-1} \sum_{K=-\frac{N_1}{2}}^{\frac{N_1}{2}-1} R(K \Delta f_1, N \Delta f_2) U(K \Delta f_1) F(N \Delta f_2) e^{i 2 \pi K \Delta f_1 z} e^{i 2 \pi N \Delta f_2 t} \Delta f_1 \Delta f_2 \quad (20)$$

其中 f_1 , f_2 与 l , ω 的关系为 $l = 2\pi f_1$, $\omega = 2\pi f_2$ ($f_1 = K \Delta f_1$, $f_2 = N \Delta f_2$)。一般把式(20)的离散（关于

z 和 t) 形式称为二维离散 Fourier 变换。一维离散 Fourier 变换的性质已阐述得很清楚^[8]。正确运用这些性质对于获得预期的正确结果特别重要。下面我们把这些性质扩展运用到二维情况中去。

把连续变换转化为离散变换时, 经历了取样和截断两个步骤, 这等价于用一个周期过程代替非周期过程。取样和截断将带来混淆和边辨误差。

(1) 如果 $U(f_1)$ 和 $F(f_2)$ 是严格局部函数 (只在有限区域上不为零), 则截断是严格的。利用 Fourier 变换对 (约定用符号 $\longleftrightarrow$ 把函数与其谱隔开, 表示 Fourier 变换对)

$$\left[\sum_{K=-\infty}^{\infty} \delta\left(t - \frac{N}{\Delta f}\right) \right] \longleftrightarrow \sum_{N=-\infty}^{\infty} \delta(f - N\Delta f) \quad (21)$$

和褶积定理, 并取 $ZG=1/\Delta f_1$, $TG=1/\Delta f_2$ 可以证明, 式(20)是声源函数为

$$\left[\sum_{K=-\infty}^{\infty} u(Z - K \cdot ZG) \right] \cdot \left[\sum_{N=-\infty}^{\infty} f(t - N \cdot TG) \right]$$

的声源系统辐射声场的严格解。其中 $\sum_{K=-\infty}^{\infty} u(Z - K \cdot ZG)$ 表示同样声源以 ZG 为间距在 Z 轴上

分布无限多个; $\sum_{N=-\infty}^{\infty} f(t - N \cdot TG)$ 则表示同样脉冲以 TG 为重复周期连续辐射。除 $Z=0$ 点,

$t=0$ 时刻开始发射的脉冲外, 其余我们均称其为虚源和假信号。对确定的接收点 R (源距 Z_R) 及有限测量时间范围 T_R , 如果从物理上看虚源和假信号的影响可以忽略, 那么式(20)算出的结果就可作为严格解的满意近似。这就为我们提供了从物理上确定 (估计) ZG 和 TG (从而确定 Δf_1 和 Δf_2) 的依据。这一分析还表明, 用式(20)不能随意算出任意 Z 点声场的正确值。 Z 的最大取值不得超过 $\pm ZG/2$, 否则会给出荒谬的结果。严格的离散 Fourier 变换式为

$$P(r_1, I\Delta Z, M\Delta t) = \sum_{N=-\frac{N_2}{2}}^{\frac{N_2}{2}-1} \sum_{K=-\frac{N_1}{2}}^{\frac{N_1}{2}-1} R(K\Delta f_1, N\Delta f_2) U(K\Delta f_1) F(N\Delta f_2) e^{i2\pi IK/N_1} e^{i2\pi MN/N_2} \Delta f_1 \Delta f_2 \quad (22)$$

$$\left(I = -\frac{N_1}{2}, \dots, \frac{N_1}{2} = -1; M = -\frac{N_2}{2}, \dots, \frac{N_2}{2} = -1 \right)$$

(2) 如果 $U(f_1)$ 和 $F(f_2)$ 不是严格的局部函数, 则截断将引起新的误差。取

$$\tilde{U}(K\Delta f_1) = U(K\Delta f_1) \left[H\left(K + \frac{N_1}{2}\right) - H\left(K - \frac{N_1}{2} + 1\right) \right] \quad (23)$$

$$\tilde{F}(N\Delta f_2) = F(N\Delta f_2) \left[H\left(N + \frac{N_2}{2}\right) - H\left(N - \frac{N_2}{2} + 1\right) \right] \quad (24)$$

显然, 这时式(23)和式(24)不是 $u(z)$ 和 $f(t)$ 的严格谱 (但通常包括了谱的主要部分), 它对声压的影响难于直接估计。我们求出式(23)和式(24)的逆变换 $\tilde{u}(z)$ 和 $\tilde{f}(t)$, 如果它们与 $u(z)$ 和 $f(t)$ 的差别实际上可以被接受, 那么只要以 $\tilde{u}(z)$ 和 $\tilde{f}(t)$ 作声源函数, 其频谱就总是严格局部化的。对有限声源 (非点源和单位脉冲) 这总是可能实现的。这样处理, 就把截断的影响用声源波形变化代替了。不同的截断间距, 仅仅意味着采用了稍微不同的声源信号。这对定