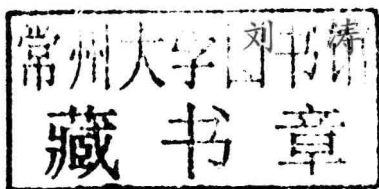


钻井液脉冲信号传输 理论与应用

刘 涛◎著

石油工业出版社

钻井液脉冲信号传输 理论与应用



著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是一部基于钻井液非线性流变规律和液电模拟原理系统阐述随钻测量(MWD)、随钻测井(LWD)系统中钻井液脉冲信号传输理论与定量分析方法的学术专著。书中主要针对LWD或MWD实际工况,建立了完整的井中钻井液脉冲信号传播过程衰减动态模型,深入分析脉冲信号在传输过程中衰减、失真的机理以及影响脉冲信号传输质量的因素,提出了改善信号传输效果的新思路。

本书注意理论与实用并重,可供从事钻井工程与测井工程相关仪器研发人员、现场施工专业技术人员阅读和参考;可作为高等院校石油工程、勘查技术与工程专业的教师、高年级本科生及研究生教材或学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

钻井液脉冲信号传输理论与应用/刘涛著.
北京:石油工业出版社,2016.12

ISBN 978-7-5183-1575-8

I. 钻…

II. 刘…

III. 钻井液-信号传输-研究

IV. TE254

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第260049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

编辑部:(010) 64523583 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

2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷

850×1168毫米 开本:1/32 印张:6.25

字数:168千字

定价:40.00元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

随钻测量(MWD)或随钻测井(LWD)系统的钻井液脉冲信号传输技术目前已经成为优质快速钻定向井和水平井、实现井眼轨道自动控制的重要基础技术之一。但是,由于这一技术领域的资料、数据专利性强或人为的垄断行为,致使这方面公开发表的基礎理论研究成果不多;涉及相关仪器结构及其设计方法的有实用价值的文献很少见;关于深入、系统阐述钻井液脉冲信号传输理论及应用的专著,目前国内尚付阙如。国外一些公司实行钻井信息传输仪器只租不卖政策,他们开发出的数学模型和软件,其应用范围也仅限于自己的项目和自己的产品,无端增添了此项技术有效开发的壁垒。目前这些问题已经制约 MWD 或 LWD 系统钻井液脉冲信号传输质量的改善与提高,亟待加强这方面基础工作使其得到解决。有鉴于此,笔者不揣冒昧,抛砖引玉,试图在这一空白领域做一些有益的工作,认真撰写此书以应有关同仁的需要。

本书是在笔者承担、完成中国石油集团西部钻探工程有限公司科技项目“钻井液脉冲信号传输动态分析方法及其在 LWD 中的应用研究”(合同编号:WF2013-152)的鉴定成果基础上写成的,其中一部分内容是首次发表。

本书的主要内容包括:(1)建立钻井液这类非牛顿流体(本书重点针对幂律流体)水击方程和平均摩擦管路理论模型,完善井中钻井液瞬变流理论基础;(2)依据非牛顿流体力学原理,建立与压力脉冲传播频率相关的幂律流体壁面剪切应力方程,剖析牛顿流体瞬变流和非牛顿流体瞬变流的本质区别;(3)针对石油工程中的 LWD 或 MWD 系统工况实际,提出钻井液瞬变流边界条件定量分析方法;(4)提出 LWD 或 MWD 系统脉冲阀处的钻

井液水击压力计算方法, 分析脉冲阀处的压力分布规律; (5) 建立 LWD 或 MWD 系统钻井液脉冲信号在传播过程中衰减动态数学模型, 深入分析信号在传输过程中衰减、失真的机理, 给出传输动态压力的计算方法; (6) 建立与频率相关的钻井液压力脉冲信号传输速度方程, 提出钻井液压力脉冲信号传输速度的计算方法; (7) 分析影响钻井液压力脉冲信号传输质量的因素, 提出改善信号传输效果的新思路; (8) 介绍笔者研制的计算机软件及其现场实验效果, 进一步丰富我国的 LWD 或 MWD 系统定量分析、仿真和现场实验技术。期望本书的内容能对促进 LWD、MWD 技术进步具有重要的理论意义和实用价值。

在从事科研工作和撰写此书过程中, 非常感谢中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院同仁给予的帮助和鼓励, 感谢中国石油大学(北京)科研基金资助(2462015YQ0509)。此外, 作者多年来一直得到恩师北京大学刘濮鲲教授、中国科学院电子学研究所王自成研究员的鼓励和教导, 同时也得到了中国石油集团西部钻探工程有限公司张忠志高级工程师以及东北石油大学胡绍彬副教授、刘日成副教授在本书出版过程中的关心和支持, 在此表示衷心的感谢!

由于笔者学识有限, 书中难免有疏漏和不妥之处, 恳请专家和广大读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 随钻测量(MWD)和随钻测井(LWD)技术简介	(1)
1.2 普通管道系统中牛顿流体瞬变流研究概况	(4)
1.3 MWD 或 LWD 系统中非牛顿流体瞬变流研究概况	(10)
第二章 钻井液流动的基本方程	(21)
2.1 钻井液的本构方程	(21)
2.2 连续性方程	(32)
2.3 运动方程	(33)
2.4 本章小结	(36)
第三章 幂律流体的微分黏度函数	(37)
3.1 微分黏度函数的精确表达式	(37)
3.2 速度梯度函数的近似表达式	(40)
3.3 微分黏度函数的近似表达式及误差分析	(45)
3.4 本章小结	(50)
第四章 幂律流体的水击方程	(51)
4.1 经典水击方程解析	(51)
4.2 幂律流体水击方程的建立	(59)
4.3 本章小结	(68)
第五章 幂律流体瞬变流壁面剪切应力方程	(69)
5.1 圆管内幂律流体瞬变流速度函数	(69)
5.2 圆管内幂律流体壁面剪切应力方程	(72)
5.3 实验验证与计算方法分析	(80)
5.4 本章小结	(85)
第六章 特征线法与边界条件方程	(86)
6.1 求解脉冲信号传输动态问题的特征线法	(86)

6.2	求解特征线法支配方程组的有限差分算法	(88)
6.3	信号传输线路边界方程及衔接条件方程	(91)
6.4	本章小结	(102)
第七章	MWD 或 LWD 系统中脉冲阀处压力计算	(104)
7.1	圆管中钻井液的瞬变压力函数	(105)
7.2	脉冲阀处压力计算方法	(117)
7.3	理论计算及实验验证	(125)
7.4	本章小结	(127)
第八章	MWD 或 LWD 系统中脉冲信号衰减机理	
	分析	(128)
8.1	脉冲信号衰减动态的数学模型	(128)
8.2	本章理论与前人实验结果的对比分析	(132)
8.3	本章理论模型的应用示例	(150)
8.4	本章小结	(152)
第九章	具有频率相关性的钻井液脉冲信号传输速度	
	研究	(154)
9.1	流体传输管道的波动方程和相速公式	(155)
9.2	幂律流体管道系统动态特征函数关系	(160)
9.3	与频率相关的钻井液压力脉冲信号传输速度	(163)
9.4	验证与计算分析	(167)
9.5	本章小结	(171)
第十章	压力脉冲信号传输动态仿真程序编制及现场	
	实验	(172)
10.1	程序的编制思路	(172)
10.2	仿真程序的编制	(172)
10.3	仿真程序的算例对比验证	(175)
10.4	仿真程序的计算示例及分析	(177)
10.5	仿真程序现场实验及结果分析	(181)
10.6	本章小结	(185)
附录	单位换算	(186)
	参考文献	(187)

第一章 绪 论

随着钻井技术的快速发展，特别是定向井、水平井井眼轨迹控制技术的不断进步，使井眼的功能由过去的“构建地面与地下的油气通道”扩展为现在的“大幅度地提高井眼在储层中的有效进尺、增强井眼与油藏的直接连通能力”。目前，应用特殊工艺井钻井技术与随钻测量(MWD)及随钻测井(LWD)结合，已经能保证井眼形成在有油气存在的区域内，实现了井眼轨迹朝着提高单井产量和提高油气田采收率的方向任意延伸，这样便自然可以提高地下油气的动用程度了。大量的国内外油田开发事实已经证明，水平井、分支井和大位移井等一系列特殊工艺井钻井方法和随钻测量(MWD)、随钻测井(LWD)结合已经成为当今提高采收率的重要技术之一^[1-11]。这一新的重要技术保证了钻井工程、油藏工程与采油工程在提高采收率方面的互补和统一，应用它可以很容易达到“少井多产”的目标。油田开发中的成功案例也清楚地表明，在某种程度上，要高质量的钻成特殊工艺井取决于MWD、LWD系统真实、快速地获取和传输地面与地下的有用信息，MWD或LWD系统工作状态的好坏决定了采用钻井方法提高采收率的目的能否实现。因此，深入研究MWD、LWD系统信息传输问题，详细论述MWD、LWD系统钻井液脉冲信号传输技术基础和应用研究成果，对完善石油钻井和测井技术、进一步提高采收率技术水平具有明显的积极作用。

1.1 随钻测量(MWD)和随钻测井(LWD)技术简介

MWD(Measurement While Drilling, 随钻测量)技术和仪器是

定向井工程师的眼睛,通过实时测量井斜、方位等参数,使人们能在地面上“看见”地层里实时的井眼轨迹,为及时调整和控制井眼轨迹提供了最佳的保证。LWD(Logging While Drilling, 随钻测井)技术可以实时测量钻井过程中地层情况,在地层原始状态或受伤害轻的情况下,就测到了电阻率、 γ 射线等地层资料,再实时上传或就地存储已测资料,这样可增加勘探找油的成功概率^[12-17]。因为在钻井液脉冲信号传输原理方面 MWD 和 LWD 两者没有本质区别,所以本书在下面的论述中对 MWD 和 LWD 不做严格区分,只重点研究两者均适用的钻井液压力脉冲信号传输信息方式等相关问题。

国内外针对随钻测量(MWD)技术的研究已经有 70 多年的历史了。随钻测量技术一出现就深受钻井和勘探工作者的赞赏。但是,由于随钻仪器结构复杂、制造维修要求很高,再加上技术保密等原因,国外的 MWD 产品均属专利产品,对无线的 MWD 产品,国外各公司原则上实行只租不卖的方针,从而更增加了对随钻测量技术进一步研究与开发的难度和神秘感。

随钻测量技术的关键问题之一是能否建立一条有效的、可靠的信号传输通道;另外一个重要问题是设计性能可靠的传感器,把井下资料准确地测量和传输出来。

随钻测量技术的突破发生在 1950 年。当时,阿尔甫斯(J. J. Arps)发明了钻井液压力脉冲传输方法,促进了随钻测量技术的发展。20 世纪 60 年代初,美国 BJ-HUGHES 公司设计了一种机械式随钻测量钻井液压力脉冲系统,于 1964 年投入工业化使用。20 世纪 70 年代初,美国 Mobil 研究发展公司推出一种导向工具与井下马达相匹配的定向测量系统。1979 年,美国 Schlumberger 公司“分析者”分公司成功地研制出一种钻井液压力脉冲传输系统,并很快投入了工业化使用。与此同时,用于各种井下参数测量的随钻传感器的研制也先后有所突破。所以,可以认为到了 20 世纪 80 年代初期,以钻井液压力脉冲作为信息传输方式的无线随钻测量技术终于在世界各地全面推广使用了。

目前,世界上已有 40 多个国外公司在从事 MWD 和 LWD 技术研究和相关仪器的研制工作,其中,采用电缆信道的有 15 家公司,采用电磁波信道的有 7 家公司,采用声波信道的有 8 家公司,采用水力信道的有 15 家公司。基于目前科学发展水平并综合考虑各种因素,石油工程领域的多数专家、学者认为,在 MWD 和 LWD 的四种主要信息传输方式中,水力信道通信更符合钻井工程实际,该方式简单便捷,通信结果较为可靠,其在目前应用市场上占据了重要地位^[18-26]。

水力信道传输数据的方法至少可追溯到 1929 年,它于 20 世纪 50 年代至 60 年代初期开始被用于测井中^[23]。水力信道的优点是不需要绝缘电缆和特殊钻杆,而是用钻井液作为传输介质;但由于压力波的扩散、调速的限制和钻井液系统其他特性的局限性,使得数据的传输速度比电磁波信道慢,且较易受噪声的影响。在水力信息通道中,由钻井泵部件不均匀摆动引起的压力脉动是其主要的干扰源。压力振荡谱的基频为 $0.6 \sim 1\text{Hz}$,它是泵的传动频率的整数倍。有用的压力脉动强度只占钻井泵出口处平均压力的 $2\% \sim 5\%$ 。国外公司经过对各种信道的 MWD 系统的应用及对比后认为,水力信道 MWD 系统的缺点与其优点相比是次要的,其传输信息具有良好的可靠性^[23-26]。

目前,水力信道 MWD 系统有三种传输信息的方式,即利用钻柱内钻井液压力正脉冲、负脉冲和连续压力波传输信息^[18-26]。

由美国 Teleco 公司生产的正脉冲传输系统,它被装在非磁性钻铤中,主要由测量地磁场方向的磁通门传感器、脉冲发生器、阀启动器和提升阀等器件构成。

当井下传感器发出信号时,启动器便使提升阀动作,对钻井液进行节流。产生的压力脉冲信号由地面检测设备检测并进行解释。在旋转钻进情况下,当钻杆停止转动而仍维持钻井液循环时,传感器启动,进行角度测量;在使用井下电动钻具进行钻进时,钻井液循环多长时间,测量便可重复进行多长时间。测量的方位角、井斜角和工具面角用 10 位二进制数字表示;传输时间

为 50s, 传输时井的深度可达 7500m 以上。

负脉冲传输系统由 Gechart-Owen 和 Gentrix 公司研制成功。其基本原理是在使用喷射式钻头或井下动力钻井时, 从井下传感器发出脉冲信号使一只装在钻铤上的阀打开, 这时钻铤内部即与井眼环空瞬时连通, 钻井液经过钻铤流到环空中, 产生连续微小的压力降, 这样就形成了一种可与正脉冲一样传输数字化信息的负脉冲。传输的数据一般采用每字 10 个二进位制符号表示, 传输速度为 1 位/s。如果编码器出现故障, 和正脉冲传输方法一样, 可以采用手动编码。

连续压力波传输系统由 Mobil 公司首先研制, 后被 Schlumberger 公司“分析者”分公司改进完善。这种系统与上两种传输方式不同, 它不是靠钻井液产生脉冲来传输井下信息, 而是通过一只由马达驱动的旋转阀来传输信息的。当旋转阀接收到由井下传感器传来的信息时, 便以一定的速度转动, 使钻井液的压力连续而有规律地变化, 产生频率为 12Hz 的连续压力波。通过在规定的时间内(0.66s), 改变或保持波的相位来传输 10 位二进制数据。相位改变 180° , 用 1 表示, 保持原相位用 0 表示。

目前, 国内的 MWD 系统绝大部分使用正脉冲及负脉冲作为信号传输方式, 连续波方式的 MWD 系统还处于试用阶段。

1.2 普通管道系统中牛顿流体瞬变流研究概况

根据水力信道信息传输原理可知, 当钻井液压力脉冲信号传输时, 钻柱内钻井液流动状态呈瞬变流状态。流体瞬变流原理是研究 MWD 或 LWD 系统水力信道信号传输动态的理论基础^[17,27-29]。

瞬变流简称水锤、水击, 也称非恒定流、水力过渡过程等。水锤问题引起人们的重视可追溯到 19 世纪^[30]。据科学考证, 1898 年 Nicolai Joukovsky 首次提出压力上升与流速变化、压力波波速及流体密度有关, 推导了波速和压力跃升之间关系的理论方程。在 Joukovsky 研究工作基础上, 1913 年 Loreuzo Allievi 创造

了水锤分析的数学方法和图解法，Allievi 的理论及分析方法与 Joukovsky 的成果一样奠定了水击研究领域的理论基础。

美国密执安大学土木工程系是世界范围内瞬变流研究的权威地之一，著名的 V. L. Streeter 教授和 E. R. Wylie 教授领导的瞬变流研究组在瞬变流研究和水锤理论分析及实验研究方面做过许多工作。1967 年他们二人出版了《液体瞬变》(Hydraulic Transients)一书，1978 年 9 月该书又定名为《流体瞬变》(Fluid Transients)出版，1983 年再版。1983 年由清华大学译成中文本《瞬变流》^[31]并由水利电力出版社出版。该书对工程技术人员和大学的教师、学生具有很高的参考价值。

1971 年英国专家 J. A. Fox 出版了专著《管网中的不稳定流动的水力分析》(Hydraulic Analysis of Unsteady Flow Pipe Networks)，此书的中译本在 1983 年已由石油工业出版社出版。Fox 教授把毕生的精力都放在了瞬变流的研究上，他的大部分研究成果都集中在这一领域，并且指导了许多博士研究生。1969 年，他研究含气对管中瞬变流波速的影响，分析和判断管道破裂的原因，并用实验验证，结果表明理论分析和实验结果相当吻合。他成立了利兹(Leeds)水力分析有限公司，承接“计划建”“正建”和“已建”管网的水锤分析项目，公司事业兴隆，大获成功，所承接的管网越来越复杂，涉及石油、化工、给排水网，完成了欧洲许多输水、输油管网的水锤分析。^[32]

随着管道水锤研究工作的发展，在英国皇家学会流体工程分会的组织下，国际上每隔几年召开一次国际压力涌波会议，总结和交流这方面的研究工作。我国从第四届(1983 年)开始才有学者参加该国际会议，清华大学在第五届(1986 年)学术会议上发表了两篇论文，王树人教授和王学芳教授等将水电站调压塔的防水锤研究及旋启式止回阀防水锤性能研究成果公布于世，引起了国内外的高度重视^[33,34]。

日本有许多教授也致力于瞬变流的研究，世界知名的学者秋元德三教授于 1972 年出版了《水击与压力脉动》一书。这本书的

日文新版于 1988 年出版。作者从 1952 年起从事了 10 余年之久的水电站测流、调速器试验及压力脉动等水锤的现场试验，他是从事工程的学者，但他不满足于一般水力学书上的讲授，他多从设计的观点来谈水锤，偏重于讨论水锤的物理概念、压力脉动现象的机理分析及防止水锤导致共振的措施。秋元德三教授写的书对水力机械、水、火电站、管道工程、泵站及民用管路系统都十分有用^[35]。

随着我国计算机技术和试验技术的进步和发展，到 20 世纪 80 年代末，瞬变流分析在我国有了长足进展。清华大学率先开展了许多方面的管网水锤分析^[30,36]，完成了许多工程研究项目，涉及输油、输水、电力、核电、供热、化工、液压、航天及阀门等工业系统，但与国外的研究成果相比，我们的差距还很大。

今天，涉及牛顿流体瞬变流研究方面的科技文献是非常丰富的，在这众多成果中，对瞬变流研究而言具有里程碑意义的成果应该首推儒克夫斯基 (Joukovsky) 方程，它是流体瞬变流领域的发祥地。儒克夫斯基方程的物理背景是典型的水击问题，该方程的缺陷是未考虑流体黏性影响。由于无黏性理想流体在真实自然界中是不存在的，所以，继儒克夫斯基之后，关于水击问题的深入研究与如何考虑流体黏性作用有直接关系，在此问题的基础上才出现了后续的研究工作和成果。

当考虑流体黏性造成的内摩擦作用效果对水击压力的影响时，有一些研究者近似地将动量守恒方程表达为下式：

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = F(\bar{u}) \quad (1-1)$$

式中： $\bar{u}$ 为流体平均流速； ρ 为流体密度； t 为时间； p 为压力； $F(\bar{u})$ 为假定的摩擦阻力项，该项在稳定流情况下通常表达为平均流速 $\bar{u}$ 的一次方项。

Binnie^[37]，Rich^[38] 和 Rouleau^[39] 研究了层流水击问题，这种情况下，方程(1-1)中的摩擦项被假设成与平均速度成正比，即

$$F(\bar{u}) = f_1 \cdot \bar{u} \quad (1-2)$$

式中： f_1 是层流摩擦函数。

Hayashi 及 Ransford^[40]研究了紊流水击问题,他们在分析问题是用 f_i 表示紊流摩擦函数,假设摩擦项与平均速度 $\bar{u}$ 的平方成正比,即有:

$$F(\bar{u}) = f_i \cdot (\bar{u})^2 \quad (1-3)$$

Brown^[41]可能是研究摩阻与频率相关性问题的第一位学者。Brown 应用 Laplace 变换的方法解决了这一问题。Brown 的研究结果表明高频分量要比低频分量被阻尼得快些,其原因是压力波前缘的陡度与高频量的出现有关,这样便可以初步解释压力波前缘失真的现象了。

Dsouza 和 Oldenburger^[42]在计算剪切力时去除了 Brown 的不可压缩流体假设,经推演也得到了与 Brown 的动量方程基本相同的结果。他们得到了理论与按正弦规律输入应力脉冲所做实验的结果十分吻合的结论,实验结果进一步支持了黏性流体瞬变流的摩阻是频率相关的观点。

许多学者通过大量的实验研究,并在一定的理论基础之上提出了不少牛顿流体的非稳定摩阻计算模型,这些模型中主要有以下四种,分述如下:

第一种,摩阻项取决于非稳定流速 v 及当地瞬时加速度 $\frac{\partial v}{\partial t}$ 。

1956 年 Daily 等^[43]研究了光滑管非稳定摩阻系数的变化规律,结果表明摩阻项取决于非稳定流速 v 与当地瞬时加速度 $\frac{\partial v}{\partial t}$;

1959 年 Carstens 等^[44]在假设稳态与非稳态湍流速度范围相近的条件下,得到湍流非稳态剪切应力是稳态与非稳态剪切应力之和。虽然他们的实验结果并不能很好地证明此公式的合理性,但是由于此类型公式的计算方法比较简单,所以,后来又有许多学者在其基础上做了进一步的研究工作。

1973 年 Safwat 等^[45]在 U 形管道中进行了系列实验,证实了振荡流动的摩阻取决于流体振荡的频率,得到了与 Carstens 等类似的模型。此外,Shuy 等^[46]、Brunone 等^[47,48]及 Kompore 等^[49]

均在考虑瞬时加速度的基础上进行了实验与理论研究,其中 Brunone 等在实验测试的基础上得到的模型至今仍被广泛应用。

第二种,摩阻项取决于非稳态流速 v 及当地瞬时加速度 $\frac{\partial v}{\partial t}$ 和对流加速度 $\frac{\partial v}{\partial x}$ 。

针对 1991 年 Brunone 等^[47,48]发展的一维模型, Vitkovsky^[50]研究了 Brunone 公式在不同的流动条件下的适用情况, Vitkovsky 等^[50]及 Bughazem 等^[51]修正了 Brunone 公式,参考文献[50, 51]的修正模型考虑了对流项,并引入了压力波速,使摩阻与管道内流体的流动特性联系起来,从而更真实地模拟了非稳态摩阻;由于他们给出的摩阻系数值依赖于雷诺数,如何将雷诺数结合到模型中将是下一步应该研究的问题。

第三种,摩阻项取决于非稳定流速 v 与历史上速度变化的权函数 $W(\tau)$ 。

1968 年 Zielke^[52]从 N-S 方程出发,利用拉普拉斯变换及其反变换推导出管道层流瞬变流管壁切应力公式:

$$\tau(t) = \frac{4\rho v}{R}v(t) + \frac{2\rho v}{R}\int_0^t \frac{\partial v(u)}{\partial t}W(t-u)du = \tau_{ws} + \tau_{wu} \quad (1-4)$$

式中: τ_{ws} 为瞬变流拟恒定剪切力; τ_{wu} 为瞬变流非恒定剪切力; W 为加权函数,与历史流速情况有关。

Zielke 的加权函数模型从理论上证实了非恒定层流摩阻等于拟恒定摩阻与非恒定摩阻之和,在一定程度上揭示了层流瞬变流摩阻的本质,简化了非恒定摩阻的计算,不受随时间变化的压力梯度的限制,可用于一般非恒定层流计算,并且其理论值与 Holmboe 等^[53]的试验结果吻合得很好。

由于参考文献[52]的理论模型忽略了对流项影响,所以对于存在较强对流条件下的计算是不准确的,而且模型数值计算需要大量的时间与存储空间,这是该模型的主要缺点。

很多研究者对 Zielke 的权函数模型进行了改进,并将其应用到湍流瞬变流中^[54-59],以扩大模型的应用范围,所得结果都与 Holmboe 等^[53]的试验结果吻合得很好。

1975 年 Trikha^[54]用近似加权函数简化了 Zielke 模型,在数值计算时只需前一时步的值,这样处理后方便了数值计算。

1981 年 Achard 等^[55]研究了二维柱体层流,以时间相关的局部平衡方程为出发点,在一维情况下得出与 Zielke 模型相同的结果。他们发现 Zielke 模型在低频率时可以表示为一阶常微分方程,在最大频率内得到了精确解;对于湍流瞬变流情况,非恒定剪切应力没有解析解,而且一维非恒定摩阻的计算变得非常复杂。

1993 年 Vardy 等^[56]在 Zielke 权函数模型的基础上提出中度雷诺数的湍流模型。1995 年 Vardy 等^[57]将其模型发展为高雷诺数的情况,将管内流体按黏度变化分为 2 个区,假设层流边界层区黏度线性变化,核心区黏度无穷大,在 Zielke 模型的基础上建立了新的理论模型。2003—2004 年, Vardy 等^[58,59]在更符合实际黏度假设基础上,推导出更合理的分别适用于水力光滑区与水力粗糙区的任意雷诺数的剪切应力模型,该模型模拟结果与实验结果吻合得更好。

第四种,摩阻项取决于管道横截面非稳定流速的分布规律。

1991 年 Vardy 等^[60]借助一维特征线法,利用同心圆柱环模型推导了拟二维非恒定摩阻计算模型,他们的模型采用一维特征线法计算,所得理论值与实验结果吻合,较精确地描述了压力波形的畸变及幅值的衰减,适用于层流和湍流流动,同时也证明了 Zielke 模型的正确性。但该模型假设断面压力为常数,计算前需要判断非恒定流动流态(目前没有明确的判别准则),且该模型考虑径向流速,控制方程多,计算采用的是适用于振荡流的五区湍流模型,对一般的非恒定流是否成立有待于进一步研究。

1992 年 Eichinger 等^[61]基于涡流黏性分析原理,建立模型描述了压力波形畸变及幅值的衰减,所得理论值与实测结果相符。此模型适用于非恒定层流及湍流,可用同一个公式计算且不必划

分流态；但该模型在求解断面流速分布时同样需要预先给定压力梯度，这一点限制了它的应用范围。此外，该模型的涡流黏性分析原理仍需大量实验结果来证实，并且他们在分析问题忽略了径向流速的影响，所以他们的方法仍然需要改进。

1997 年 Silva-Araya 等^[62]推导了适用于水力光滑管湍流的模型。该模型假定能量耗散与摩阻损失成正比，在摩阻项中引入能耗因子，提出了新的动量方程。分析参考文献[62]的成果可见，该新建模型采用的运动方程忽略了对流加速度的二阶空间导数和径向速度分量，在流速趋近于零时能耗因子趋向无穷大，显然不符合实际，因此有待于进一步研究能量耗散模型，尤其是能量耗散因子的确定方法。

除上面介绍的四种模型外，目前又有人发明了辨识校正摩阻系数方法。辨识校正摩阻系数方法^[63,64]的新意是在建立管道瞬变流动控制方程组的基础上，将摩阻系数作为未知的变量，采集不同工况下测量点的实时数据，采用传统辨识方法、最优化方法、奇异值分解方法、瞬变流反问题分析方法、遗传算法等进行数值计算，辨识管道内各个管段未知的摩阻系数。研究表明：辨识校正管道及管网摩阻系数需要尽可能多的实测数据，并要求保证测量数据相关性尽可能小，以减小辨识校正的误差。经过研究还表明，摩阻系数并不是一成不变的，随着时间的推移，工况和操作点可能发生变化，需要对其进行在线或离线修正，以得到更适合当时状况的辨识模型，这样可有效提高模型的适应范围。

这里需要强调说明，上面综述的普通管道系统中牛顿流体瞬变流研究，没有一项是针对 MWD 或 LWD 系统的，严格地讲，上面的所有结论不适用于像钻井液这类纯黏性无弹性非牛顿流体瞬变流问题。

1.3 MWD 或 LWD 系统中非牛顿流体瞬变流研究概况

目前，大多数随钻测量系统采用钻井液压力脉冲信号传输方