

油管柱振动机理研究 与动力响应分析

YOUGUANZHU ZHENDONG JILI YANJIU
YU DONGLI XIANGYING FENXI

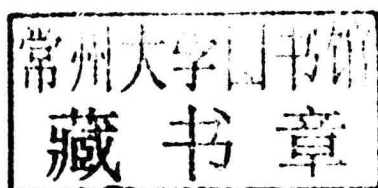
黄 桢 黄有为 著



重庆大学出版社
<http://www.cqup.com.cn>

油管柱振动机理研究 与动力响应分析

黄 桢 黄有为 著



重庆大学出版社

内 容 提 要

本书总结了作者多年以来围绕天然气井油管柱的振动而开展的研究工作。内容主要包括:国内外研究油管柱振动的现状及研究方法;利用理论和数值模拟方法,研究了天然气井开采过程中流体通过油管柱时在管柱内的流动规律,以及油管柱本身的结构特点对流体流场的影响;研究了油管柱的动力学特性;分析了某构造井开采过程中考虑流体的作用和不考虑流体的作用两种工况下油管柱的各阶固有频率;研究了流体在管柱内流动过程中对油管柱的动力学响应规律;分析了某位置的响应速度、加速度等动力学参数;在理论研究、数值模拟研究的基础上,提出了油管柱的减震措施,并提出了减震器的原理。本书内容翔实,全面反映了天然气井开采过程中的流体流动诱发管柱振动机理、油管柱动力学和减震措施等方面的研究动态及研究方向。

本书可作为石油工程领域的工程技术人员、高等院校相关专业的研究生进行管柱系统研究的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

油管柱振动机理研究与动力响应分析/黄桢,黄有为著. —重庆:重庆大学出版社, 2012. 9
ISBN 978-7-5624-6796-0

I. ①油… II. ①黄… ②黄… III. ①油管柱—振动理论—研究 IV. ①TE931

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 125840 号

油管柱振动机理研究与动力响应分析

黄 桢 黄有为 著

策划编辑:曾显跃

责任编辑:谭 敏 曾春燕 版式设计:曾显跃

责任校对:陈 力 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617183 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:10.5 字数:262 千

2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5624-6796-0 定价:38.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

序

本书在对川东气田油管损坏情况作了深入的调查的基础上,通过对气井生产期间产量、压力实测数据的分析研究,提出了生产期间气井产量、压力的波动是导致油管柱振动的根本原因,油管柱的振动诱发了油管先期损坏。关于油管柱的振动问题过去研究得很少,主要研究的是油管柱的静力学问题。本书首先应用流体激振与流体力学的理论,研究了天然气在油管柱内流动过程中,诱发油管柱振动的机理;然后应用现代振动理论建立了油管柱振动分析模型及动力响应分析模型,并用川东地区的实际井况资料,系统地分析了油管柱在井下的振动特征;最后通过分析计算提出了减缓油管柱振动的技术思路。

当天然气在油管柱内流动的激励力的变化频率与油管柱某一阶固有频率接近时,油管柱将发生共振,这将加剧油管柱的破坏。本书以流体力学的基本理论为基础,分析了天然气在油管柱内流动的运动形式,建立了天然气在油管柱内流动的传输方程与运动微分方程,分析了天然气在油管柱内流动时产生旋涡的区域,并给出了旋涡分析的方法。利用流体振荡力学的方法,建立了天然气在油管柱内流动过程中,油管柱的振幅方程,并利用参数多项式方法对天然气振荡流场进行求解。以建立的理论模型为基础对天然气在油管柱内流动可能诱发油管柱振动的油管内径变化、油管弯曲(即轴向受压屈曲、定向井中随井眼的弯曲及井口装置中管汇的弯曲)、节流阀开关处流速的变化,以及天然气产量和压力变化等因素进行了定量研究,计算表明,天然气流过油管内径变化、油管弯曲、节流阀等处会引起天然气流速、天然气对油管柱作用的压力的变化,而流速和压力的变化将诱发油管柱振动;同时天然气流速的突然变化也将对油管柱产生冲蚀。对于高压、高产气井,振动和冲蚀是导致油管柱破坏的主要原因之一。

以井下整个油管柱为研究对象,提出了利用模态理论来建立油管柱的振动分析模型,模型包含了有阻尼、无阻尼和流

固耦合振动等工况。利用模态理论建立的模型,可方便地求解油管柱结构的离散化问题,油管柱的固有振动特性可通过固有振动频率、振动形式(模态)及模态阻尼等参数来表示。在对油管柱振动方程分析的基础上,通过评价分析与应用研究,提出了应用反幂法与 Lanczos 法求解油管柱振动的特性。实例计算表明:随着振动阶数的升高,油管柱振动频率增大,有封隔器约束时油管柱的振动频率大于无封隔器约束时油管柱的振动频率;随着振动阶数的升高,振型投影曲线的波形周期变小,但对于带有封隔器的油管柱,其在过油管柱轴线平面上的投影曲线在油管柱中段的波形发生突变;随着油管直径的增大,其固有振动频率增大、振幅减小;随着井深的增加,其固有振动频率减小、振幅增大;天然气产量越大,油管柱的固有频率越小,油管柱越易发生共振,且发生共振时的振幅越大。

在求解油管柱动力响应方法上,本书通过对线性和非线性动力响应分析法的比较,结合油管柱的受力特性,提出了利用非线性动力响应分析法来进行求解,并给出收敛准则。使用该方法可得到油管柱上任意一点的应力、速度、加速度随时间变化的规律。实例计算表明:随着管径的增大,响应综合应力、响应速度和响应加速度的最大值都减小;随着井深的增大,响应综合应力的最大值减小,而响应速度和响应加速度的最大值增大。

通过计算对比分析,本书提出了油管柱减震的概念,设计了油管柱减震器的工作原理及安装位置,为减缓油管柱振动提供了技术思路。

本书通过对油管柱的振动分析,得到了油管柱动态载荷,为提高气井油管柱设计的可靠性,提供了依据,对预防油管先期损坏,具有重要的意义,对现场工程技术人员,科研院所研究人员也具有参考意义。



2012 年 7 月

前言

井下管柱在油气井和油气田勘探开发中的作用,不论是在功能上还是在费用上都占据着举足轻重的地位。特别是随着油气井进入中后期开发阶段,井下管柱功能逐年降低,而井下工况越来越复杂,从而导致管柱损坏日益增多,管柱损坏机理更加复杂。油气(水)井井下管柱的大量损坏,大大削弱了油气田稳产的基础,已经给我国乃至世界油气生产带来了十分严重的损失,从而成为制约包括我国在内世界上多个油气田持续稳定发展的一大重要因素。

在天然气开采过程中,由于流体在管柱系统内流动非常复杂,流体在管柱各段的组成、压力、温度都不相同。因此,油管柱在各个区域的破坏是什么占主导因素,值得进行深入研究。通过对修井过程中管柱系统形貌进行分析,发现诱发油管柱破坏的主要因素有共同之处,主要有:

- ①腐蚀性介质对井下管柱的腐蚀破坏;
- ②流体在管柱系统内流动过程中,对管柱系统的冲蚀破坏;
- ③流体在管柱系统内流动过程中诱发管柱的振动;
- ④管柱自身的质量,对管柱的应力;
- ⑤以上几项的综合作用。

为了对井下管柱的剩余疲劳寿命进行精确预测,必须对诱发管柱的损伤机理进行全面地理论研究、实验研究。结合生产现场气井管柱系统的破坏与流体成分、地层压力、温度、产量等因素,本书从以下几个方面对天然气井管柱的破坏机理开展了以下几个方面的研究:

1) 流体对管柱的腐蚀破坏机理研究

通过开展理论、实验研究,获取流体中的 CO_2 、 H_2S 、 O_2 、 Cl^- 等对管柱系统的腐蚀机理,建立了酸性气体对管柱的腐蚀模型。

2) 提出基于最大蚀坑深度的管柱腐蚀损伤模型

根据管柱腐蚀形貌的统计特征,提出基于最大蚀坑深度的管柱腐蚀损伤模型。建立了不同形貌参数下,腐蚀总体积和最大蚀坑深度的数据库。通过数值分析,获得腐蚀总体积和最大蚀坑深度之间的相互关系。利用有限元分析方法,对

管柱系统应力集中系数进行预测,可以对管道内腐蚀状态作出更精确的评估,为管柱系统安全评估提供更为详尽的依据。

3) 天然气井筒内气砂两相流研究

在全面总结固体颗粒在流体中的沉降以及气固两相流动理论的基础之上,针对天然气井筒中高压、高温气流携带固体颗粒举升进行力学分析,建立了井筒气流携砂的力学模型,可针对气井不同的压力、温度、偏差因子等条件,确定气井携砂生产的最小临界流量。

4) 流体在管柱系统内多相湍流流动及对管柱系统冲蚀破坏研究

通过流体从地层进入管柱系统,到流体进入井口装置整个过程,对多相湍流流动进行研究。利用理论、数值模拟,研究流体对管柱系统的作用力沿管柱的变化规律;研究流体在各个不同区域的压力场、速度场、温度场的分布;定量、定性地探索流体中颗粒的流动,流体对管柱系统的冲蚀;流体在通过两根油管间的接箍“J”环区,存在涡流对管柱的破坏影响。

5) 油管柱刚、强度数值模拟

利用管柱系统的结构特点,利用有限元分析理论,采样接触分析的方法,研究流体在管柱系统流动过程中,在非线性载荷的作用下,油管柱系统任意区域、任意位置的应力、变形及其分布规律,探索在腐蚀环境下,管柱系统的刚、强度变化规律及其破坏机理。

6) 油管柱的动力学响应研究

流体在管柱内流动,是一个非线性的瞬态流动,将会诱发管柱振动。利用流体对管柱流动压力的变化,开展管柱的动力学响应研究,分析管柱任意位置的响应速度、加速度、应力的变化规律,探索瞬态流动对管柱疲劳寿命的影响规律。

长期以来,作者及其研究团队潜心于天然气井井下管柱的剩余疲劳寿命预测研究。一直高度关注天然气井管柱的破坏情况。通过对生产现场管柱的破坏情况进行总结分析,并开展破坏机理的理论研究,深入探索天然气井管柱的疲劳寿命预测,较早或同步地与国内外同行进行着同样的理论和工程科学与技术问题的研究。积累了很多相关的研究成果,并将其运用于工程实践。本书较系统地介绍了井下管柱破坏的机理、破坏规律、数值模拟等方面的内容,望能对油气井井下管柱疲劳寿命的预测及相关领域研究人员具有一定参考价值。由于作者水平有限,书中的一些观点难免有错误和不妥之处,欢迎读者批评指出,在此表示感谢!

作者

2012年7月

目 录

1 绪 论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书研究目标及主要内容	7
2 天然气诱发油管柱振动的机理	9
2.1 天然气在油管柱内的流动分析	9
2.2 天然气在油管柱内流动的旋涡分析	19
2.3 天然气在油管柱内流动对油管柱的激振分析	25
2.4 天然气在油管柱内流动的振荡流场计算及天然气对 油管柱作用的压力分布规律	39
2.5 不同产量下天然气对油管柱作用的压力分布规律	68
2.6 本章小结	72
3 油管柱振动模型的建立	73
3.1 无阻尼作用油管柱振动模型	73
3.2 天然气油管柱流固耦合振动模型	82
3.3 有阻尼作用的油管柱振动模型	84
3.4 本章小结	88
4 油管柱振动固有特性分析	89
4.1 油管柱特征值的计算方法	90
4.2 油管的振动固有特性计算	102
4.3 天然气产量与油管柱振动特性的关系	110
4.4 本章小结	112

5	油管柱动力响应分析	114
5.1	油管柱结构动力响应分析	116
5.2	油管柱非线性结构动力响应分析	121
5.3	油管柱的动力响应分析	128
5.4	本章小结	143
6	油管柱减震技术探索研究	144
6.1	油管减震器安放位置的理论计算	144
6.2	油管减震器工作原理	148
6.3	本章小结	149
7	结论与建议	150
	附录 符号说明	152
	参考文献	155

1.1 问题的提出

油管柱是油气生产中的关键工具,在井下,其受力情况极为复杂,由于各方面的原因造成油管柱的破坏时有发生。就川东气田而言,据统计,已发生 189 井次的弯曲变形、断掉落井、封隔器失效、腐蚀碎块等千奇百怪的油管事故,造成直接经济损失达 6.62 亿元。从这些油管事故的处理和统计资料分析中发现,油管柱断掉落井占事故的 87% 以上。

对于川东气田,发生油管断落入井,一方面是由于川东气田先天不足,地层流体所含的 H_2S 、 CO_2 、有机酸、无机盐、 H_2O 对油管形成长期的酸碱盐综合腐蚀;另一方面是由于后期作业中的施工工艺及所用化学剂等方面不合理甚至错误,导致井下油管大面积或局部穿孔,破裂、断落,管壁变薄等;第三方面是由于油管柱力学方面的原因,尤其是油管柱动力学即振动方面的原因,这在高压、高产气井中尤为突出。

诱发油管柱振动的原因主要是气井生产时的气井产量、压力、管柱尺寸、气流速度、复合油管柱、流固耦合等因素,图 1.1、图 1.2 分别是现场实测的川东某构造 14 号井生产、测试过程中油管压力、产量与时间的关系曲线。从图中可见产量、油管压力是波动的,正是由于产量、油管压力的波动,引起了油管柱的振动。

油管柱的振动,增大了管柱所受的应力、使应力集中加剧,从而加剧油管柱的疲劳破坏而使其断落入井。在川东气田的油管断落入井的油管事故井的修井打捞作业中,从一些井中打捞出的落鱼观察,发现几乎没有腐蚀痕迹;同时这些井不含腐蚀性的流体,且生产时间很短;在这些井平时的生产中,从地面可观察到采气井口和地面管汇的振动,这就充分说明油管柱振动是引起油管柱破坏的原因之一,很有必要对油管柱的振动机理及动态应力分布进行研究。

但迄今为止,国内外学者仅对钻柱振动展开了一些研究,而对油管柱振动的研究几乎未开展,从文献中检索到的唯一一篇关于油管柱振动的初步研究还是与本书作者合作发表的。为此,本书首先应用流体激振与流体力学的理论研究了天然气在油管柱内的流动过程中诱发油管柱振动的机理;然后以井下整个油管柱为研究对象,运用现代力学分析理论,建立了符合

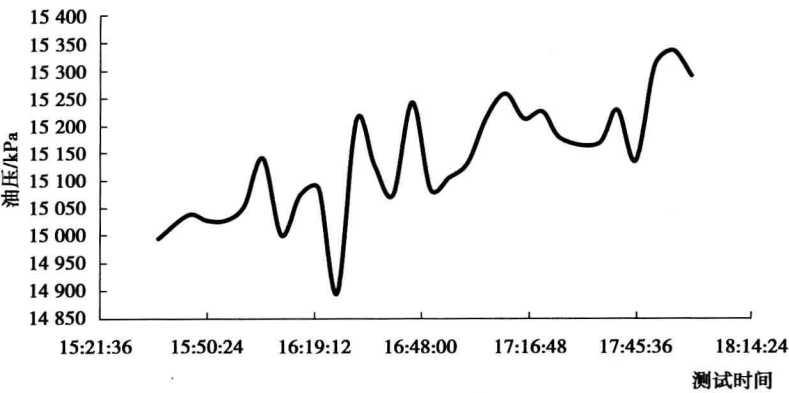


图 1.1 某构造 14 号井实测压力随时间变化的曲线

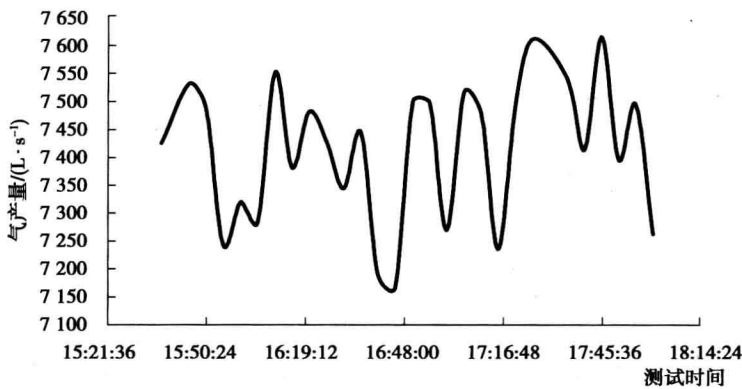


图 1.2 某构造 14 号井实测产量随时间变化的曲线

井下实际的油管柱振动模型和动态应力计算模型,以计算油管柱振动的固有特性、分析油管柱动态应力的分布规律。最后以油管柱振动机理和动态应力分布规律为基础,探索了减震的方法、原理及装置。

1.2 国内外研究现状

有关管柱在无限空间(只有端部或管体上有限个点处受到外部约束)中的力学分析的技术文献不胜枚举,但石油工程中遇到的管柱大多处于井眼(有限空间)中。由于井眼限制,管柱屈曲后将与井壁或套管内壁发生接触,从而使该问题的分析变得更为复杂。自 20 世纪 50 年代开始,井下管柱的力学研究一直是国内外石油科技工作者普遍关注的课题,国内外许多学者分别利用不同的方法(能量法、解析法、数值法、实验法),考虑不同影响因素(内外压、自重、摩擦、端部约束等),针对不同井眼(垂直井眼、斜直井眼、水平井眼、弯曲井眼),从不同的侧面(稳定性、载荷传递、自锁、强度、变形等),对这一问题进行了深入、广泛的理论和应用研究,并取得了许多重要的研究成果。

1950 年,Lubinski 首先研究了钻柱在垂直井眼中的平面(正旋)屈曲,并根据钻柱的受力

及变形分析,导出了钻柱在垂直平面内的弯曲方程^[1]:

$$\frac{d^3 y}{dx^3} + x \frac{dy}{dx} + c_1 = 0 \quad (1.1)$$

并给出了该方程的级数解,还利用边界条件给出了钻柱在垂直平面内发生失稳弯曲的临界载荷计算公式:

$$F_{cr} = k \left(\frac{EI}{q'} \right)^{\frac{1}{3}} q' \quad (1.2)$$

并给出了失稳弯曲钻柱在井眼中的屈曲形状、与井壁接触点位置、钻头偏转角、屈曲后钻柱的变形、弯矩的变化及相应的弯曲应力等的计算方法。

随后,Lubinski、Woods 对斜直井中的管柱进行了模型试验。通过试验观察到管柱在井眼中的螺旋屈曲现象,并注意到井斜角对管柱的临界载荷有较大的影响。

Lubinski 后来在一次私人通信中提到了他们通过对试验数据的拟合,得到的管柱在斜直井中发生螺旋屈曲的临界载荷的计算公式(该公式后来由 Dawson、Paslay 公开发表^[11]):

$$F_{cr} = 2.85 (EI)^{0.504} q'^{0.496} \left(\frac{\sin \varphi}{r} \right)^{0.511} \quad (1.3)$$

1957 年,Lubinski、Blenkarn 等对抽油井中油管及抽油杆柱的螺旋弯曲进行了研究^[2],首次提出了抽油杆柱和油管在轴压及内外压作用下发生空间螺旋弯曲的概念和内压引起管柱失稳的概念。

1962 年,Lubinski、Althouse、Logan 等又研究了带封隔器管柱的螺旋弯曲行为^[3],讨论了鼓胀效应、活塞效应、温度效应以及螺旋弯曲效应等 4 种基本效应所引起管柱轴向位移的计算问题。提出了“虚构力(Fictitious Force)”的概念,利用能量法导出了管柱发生螺旋弯曲后螺距与轴向压缩力(包括内外压所产生的“虚构力”)之间的关系,以及因螺旋弯曲管柱轴向位移的计算公式:

$$p^2 = 8\pi^2 \frac{EI}{F} \quad (1.4)$$

$$\Delta L = \begin{cases} \frac{F^2 r^2}{8EIq'} & (F < Lq) \\ \frac{F^2 r^2}{8EIq'} \left[\frac{Lq'}{F} \left(2 - \frac{Lq'}{F} \right) \right] & (F \geq Lq) \end{cases} \quad (1.5)$$

这些研究奠定了垂直井封隔器管柱力学研究的基础,所给出的算法是封隔管柱设计和作业参数选择的重要理论依据,被广泛应用于井下作业管柱的设计及施工中。

20 世纪 70 年代末到 80 年代初,Hammerlindl 在 Lubinski 螺旋弯曲理论的基础上,进一步讨论了带封隔器多级组合管柱的受力、应力和位移的计算问题^[4];讨论了液体压力对管柱屈曲性能的影响和“中性点”的计算问题^[5];研究了多封隔器管柱及其中间封隔器的受力计算问题^[6]。这些研究进一步扩大了 Lubinski 理论的适用条件及应用范围。

1988 年,Mitchel 运用梁柱在三维空间的静力平衡方程、变形几何方程和物理方程,首次导出了考虑自重时管柱在斜直井眼中发生失稳弯曲时的变形计算及正压力计算的微分方程(屈曲方程)^[7]:

$$EI \left[\frac{d^4 \theta}{dx^4} - 6 \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 \frac{d^2 \theta}{dx^2} \right] - \frac{d}{dx} \left[F(x) \frac{d\theta}{dx} \right] + \frac{q}{r} \sin \varphi \sin \theta = 0 \quad (1.6)$$

$$\frac{N}{r} = EI \left[4 \frac{d\theta}{dx} \frac{d^3\theta}{dx^3} + 3 \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^2 \right] + F(x) \left(\frac{d\theta}{dx} \right)^4 - \frac{q}{r} \sin \varphi \cos \theta \quad (1.7)$$

给出了该方程在 $\varphi = 0$ 条件下(在垂直井中)的数值解。计算结果表明:当螺旋弯曲段的无因次长度 $n_d > 5$ 时,数值解与 Lubinski 用能量法导出的螺距计算公式(1.4)吻合较好;而当 $n_d \leq 5$ 时,两者之间存在较大误差,这时 Lubinski 理论已不再适用。不过,实际下井的管柱都满足 $n_d > 5$ 的条件。1995 年, Mitchell 又根据方程(1.6)研究了井斜对管柱螺旋弯曲的影响^[8],给出了方程(1.6)的数值解($\varphi \neq 0$);根据数值解,他还给出了管柱从直线状态到平面(正弦)弯曲状态,以及从平面正弦弯曲状态到螺旋弯曲状态过渡的临界点。1996 年, Mitchell 提出了一种分析斜直井中屈曲行为的实用方法^[9],通过非线性方程数值的求解,简化了计算公式,简化公式计算结果与数值解能够较好吻合。

1964 年, Paslay 等利用能量法对管柱在斜直圆孔中的稳定性进行了理论分析,导出了管柱发生正弦弯曲时临界载荷的计算公式^[10]:

$$F_{cr} = EI \left(\frac{L}{\pi} \right)^2 \left[n^2 + \frac{q \sin \varphi}{n^2 EI r} \left(\frac{L}{n} \right)^4 \right] \quad (1.8)$$

1984 年, Dawson、Paslay 等给出了上式的极小值公式^[11]:

$$F_{cr} = 2 \left(\frac{EI q \sin \varphi}{r} \right)^{0.5} \quad (1.9)$$

他们将该式作为斜直井中钻柱失稳载荷的计算公式。

1990 年, Yu-Che Chen 等利用能量法导出了管柱在水平井中发生正弦及螺旋弯曲时临界载荷的计算公式^[12],并通过试验证明了他们用能量法导出的临界载荷计算公式的合理性^[12]。由于不能连续加载,其试验结果没有给出临界载荷的准确测试结果。以下两式为其导出的临界载荷的计算公式:

$$F_{crs} = 2 \left(\frac{EI q}{r} \right)^{0.5} \quad (1.10)$$

$$F_{crh} = 2 \sqrt{2} \left(\frac{EI q}{r} \right)^{0.5} \quad (1.11)$$

当 $\varphi = \pi/2$ 时, Lubinski 给出的试验拟合公式(1.3)与上式很接近。

1993 年 Wu Jiang 等利用能量法分析了管柱在大位移井、水平井中的螺旋弯曲和摩擦阻力的计算问题,给出了螺旋弯曲临界载荷计算公式为^[13-14]:

$$F_{crh} = 2(2\sqrt{2} - 1) \left(\frac{EI q \sin \varphi}{r} \right)^{0.5} \quad (1.12)$$

对于弯曲井眼,由于管柱在弯曲井眼中的变形和载荷描述比直井要复杂得多,因此弯曲井眼中管柱稳定性和螺旋弯曲的分析也很复杂。1993 年, He Xiaojun、Kyllingstad^[15]通过类比分析认为:屈曲前井壁对管柱的法向支反力与管柱临界载荷之间存在一定的关系。在水平井眼中,井壁作用于管柱的法向支反力 $f_n = q$;而在弯曲井眼中其法向支反力为:

$$f_n = \left[\left(q \sin \varphi + F \frac{d\varphi}{dx} \right)^2 + \left(F \sin \varphi \frac{d\psi}{dx} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (1.13)$$

分别将式(1.10)与式(1.11)中的 q 用式(1.13)中的 f_n 代替,可得弯曲井眼中临界载荷的计算公式:

$$F_{cr}^4 = \left(\beta \frac{EI}{r} \right)^2 \left[\left(q \sin \varphi + F \frac{d\varphi}{dx} \right)^2 + \left(F \sin \varphi \frac{d\psi}{dx} \right)^2 \right] \quad (1.14)$$

当 $\beta=4$ 时为正弦弯曲;当 $\beta=8$ 时为螺旋弯曲。同时 He Xiaojun 利用小尺寸模拟试验证明了他们所提出的弯曲井眼中,管柱发生螺旋弯曲临界载荷计算公式的合理性;但并没有给出正弦失稳临界载荷的测试结果^[15]。

1993 年, Yu-che chen、Sarmad Adnan 等考虑重力及井眼弯曲的影响,用能量法得出了水平井眼、弯曲井眼的临界正弦和螺旋屈曲载荷^[16]。1995 年, Kyllingstad^[17]利用力和力矩导出了式(1.13),用最小能量原理推出了式(1.10)和式(1.11)(其中 q 用式(1.13)中的 f_n 代替),并通过数值方法得出的临界螺旋屈曲载荷为:

$$F_{crh} = 1.45 \sqrt{\frac{4EI f_n}{r}} \quad (1.15)$$

式中,1.45 比 $\sqrt{2}$ 大 2.5%,相当于 $\beta=8.41$ 。

考虑摩擦时,管柱的内力、应力和变形状态不仅与最终的受力状态有关,而且与载荷的变化历史(加载、卸载历程)有关;是边界条件的多值函数(由确定的位移和力边界条件,不能完全确定摩擦力的大小和方向,而与受力变化的历史有关)。1984 年, Johancsik 等提出了定向井中钻柱摩阻和摩擦阻力矩计算的软管模型^[18],但该模型仅适用于处于稳定状态的管柱。1986 年, Mitchell 提出了考虑摩擦时垂直井眼中管柱螺旋弯曲分析的简单模型^[19],分析了摩擦对钻压传递效率以及管柱轴向位移的影响。1993 年, He xiao jun 等分析了管柱在弯曲井眼中处于稳定状态及螺旋弯曲状态时的摩擦力计算方法^[15],并提出了“自锁”的概念。同年, Wu Jiang 等人也分析了水平井中管柱螺旋弯曲时的摩擦力计算问题^[14]。1995 年, Wu Jiang 研究了水平井、斜直井和弯曲井眼中管柱正弦及螺旋弯曲时的摩擦力计算问题^[20]。1996 年, Mitchell 提出了基于位移分析,考虑摩擦影响的管柱屈曲综合分析方法^[21],其分析结果表明:摩擦对管柱的载荷和位移分布有很大的影响。同年, Mitchell 分析了弯曲井眼中流体对管柱受力的影响,得到了总的流体负载为^[22]:

$$\begin{aligned} \vec{W}_f = & [(P_o A'_o - P_i A'_i) + dP_f A_i + \alpha dP_{fo} A_\alpha] \vec{\tau} + [(x\rho_o v_o^2 A_\alpha - \rho_i v_i^2 A_i) + \\ & (P_o A_o - P_i A_i)] k_0 \vec{n} + (\rho_i A_i - \rho_o A_o) [\vec{g} - (\vec{g} \cdot \vec{\tau}) \cdot \vec{\tau}] + \vec{W}_{oe} \end{aligned} \quad (1.16)$$

同国外相比,我国在这方面的研究工作起步较晚,20 世纪 80 年代初才开始油管柱力学方面的研究工作。无论是理论研究或是实验分析都与国外有很大的差距。但是经过广大科技工作者的努力,已经取得了较大的进展。

20 世纪 80 年代初,曾宪平^[23]、张宁生^[24]、江汉采油工艺所^[25]等结合 Lubinski、Hammerlindl 等人的文献对封隔器管柱的受力、应力及变形作了系统的分析。1986 年, 窦益华^[26]采用加权残值法对管柱的受力变形进行了分析求解。1988 年, 龚伟安^[27]用弹性力学方法分析了液压作用下管柱的弯(屈)曲问题。他论证了液压作用下管柱的弯(屈)曲的“虚构力”是真实存在的力,并对液压作用下管柱的失稳条件、“虚构力”、中和点及零应力点作了阐述。1990 年, 金国梁、陈琳^[28]等通过对抽油杆柱的屈曲分析,讨论了滚轮接箍扶正器的合理配置。1992 年, 郑永刚^[29]对管柱在井眼内的弯曲失稳进行了研究,用流体力学方法分析了浮力对管柱的作用,从理论上证明了浮力不可能使管柱弯曲失稳。但他认为“虚构力”是不存在的,管柱内外压仅引起轴向应变,而不能引起轴向应力(在自由伸长情况下),因为自由伸长的管柱受内外压作用属于平面应力问题。1993 年, 冯建华^[30]依据 Lubinski 等人的管柱受力分析理论,建立了双封隔器复合管柱受力分析的数学模型,并结合油田实际,介绍了封隔器受力及其

承受压差的计算方法。1994年,李子丰^[31]等研究了水平井中管柱受压扭的几何非线性弯曲,建立了管柱的微分方程和边界条件,并作为特例分析了无重管柱的螺旋弯曲。同年,彭勇、王启玮^[32]根据能量法原理,导出了水平井段井下钻具组合稳定性分析的临界载荷计算公式,并用最优化理论解决了钻具组合变形曲线的半波数难于直接确定问题。1995年,李子丰^[33]等对油(气)井管柱进行了力学和运动学分析,建立了几何方程、运动平衡方程和本构方程。其基本假设如下:

- ①管柱变形是线弹性的;
- ②管柱横截面为圆形;
- ③剪力对管柱变形的影响不计。

同年,高宝奎、高得利^[34]研究了斜直井中钻柱的屈曲问题,并考虑了几种极限情况下的屈曲行为。1994—1996年,高国华^[35-41]等对水平井眼、垂直井眼和弯曲井眼中管柱的屈曲行为进行了系统的研究。通过微元体的受力分析,根据静力平衡方程、变形几何方程和物理方程导出了三维弯曲井眼中的屈曲方程:

$$\frac{d^4\theta}{d\alpha^4} + 2\frac{d}{d\alpha}\left\{\left[\beta - \left(\frac{d\theta}{d\alpha}\right)^2\right]\frac{d\theta}{d\alpha}\right\} + \sin\theta = 0 \quad (1.17)$$

$$n = -\left(\frac{d\theta}{d\alpha}\right)^4 + 4\frac{d\theta}{d\alpha}\frac{d^3\theta}{d\alpha^3} + 3\left(\frac{d^2\theta}{d\alpha^2}\right)^2 + 2\beta\left(\frac{d\theta}{d\alpha}\right)^2 + \cos\theta \quad (1.18)$$

$$\frac{d\beta}{d\alpha} = \eta n - \eta_1 \cos\varphi \quad (1.19)$$

该方程有三种不同形式的解,即零解、周期解(或拟周期解)和螺旋线解(或拟螺旋线解),对应于三种平衡状态,即稳定平衡状态、正弦屈曲状态和螺旋屈曲状态。1997年,黄桢^[42]应用动力场分析的方法建立了井下油管在井下阻卡时,上提负荷的力学模型,推导出计算上提负荷的理论公式。同年^[43],又建立了深井中油管柱受压扭几何非线性弯曲的微分方程和边界条件,分析了细长油管柱的螺旋弯曲特性,给出了油管柱螺旋弯曲变螺距的计算方法。1998年,刘凤梧^[44]采用解析法对无重管柱在承受扭矩作用时的屈曲行为进行了分析,求出了其解析解,得到了受压扭组合作用的管柱屈曲构形为精确的螺旋线的结论。随后在1999^[45]年,又对水平井的情况进行了研究,并考虑自重的影响,用小参数摄动法对方程进行了求解,讨论了自重对管柱屈曲的影响。

可以看出,20世纪80年代以前,研究工作主要侧重于管柱在垂直井眼中的稳定性和螺旋屈曲分析^[1-4]。80年代以后,特别是90年代以来,由于定向井、水平井、大位移井等工程应用的需要,研究的重点转向了斜井、水平井以及弯曲井眼中管柱的稳定性、屈曲以及自锁分析^[5-23]。国内外许多学者分别利用解析方法、能量方法、数值方法和试验方法对管柱在垂直井、斜直井、水平井和弯曲井眼中的稳定性和屈曲行为进行了理论和试验研究。理论和试验研究表明,管柱在井眼中有4种不同的平衡状态和空间构形:稳定状态、正弦弯曲状态、螺旋弯曲状态和自锁状态。在这4种不同的平衡状态之间,存在3个临界点。上述文献分别从不同的侧面对临界载荷的确定以及不同平衡状态下的管柱与井壁之间正压力、轴力和扭矩分布的计算进行了阐述。这些研究成果对油气井的生产、测试等作业起到了重要的指导作用。

但上述文献所进行的研究都是针对井下管柱的静力学行为的,而在井下管柱的动力学研究方面,迄今为止,国内外学者仅对钻柱动力学展开了一些研究,而对油管柱动力学的研究几

乎未开展,从文献中检索到的唯一一篇关于油管柱振动的初步研究还是本书作者所发表的,即蔡亚西、黄桢等^[46]在1998年发表的“油管柱固液耦合振动分析”,该文基于1995年黄桢硕士论文提出油管柱振动基本概念,从动力学中固液耦合振动的角度出发,研究了油管柱内流体不稳定流动引起的油管柱振动问题。考虑液动压力对油管柱纵向振动的影响,建立了油管柱纵向振动微分方程,并给出了这种情况下油管柱纵向振动的频率方程。通过实例计算分析,指出井内流体不稳定流动时,油管柱会产生相当高的附加动载,这个动载是造成油管柱在生产过程中发生疲劳破坏的主要原因之一。虽然该文对油管柱振动作了一些初步探索,但还存在许多不足,还需对油管柱的振动机理、振动固有特性计算、动态响应分析以及减震措施等方面进行大量的研究。因此,本书以井下整个油管柱为研究对象,运用现代力学分析理论,建立了符合井下实际的油管柱振动模型和动态响应计算模型,揭示了油管柱的振动机理、计算了油管柱的固有特性、分析了油管柱动态响应,探索了减震的方法、原理。这些研究将为油管柱的设计、生产参数的选择以及特殊作业的施工等奠定基础,以达到延长油管寿命、减少油管破坏的目的。

1.3 本书研究目标及主要内容

1.3.1 研究目标

本书的研究目标是:在现有封隔器管柱静力学研究的基础上,研究天然气在油管柱内的流动过程中诱发油管柱振动的机理,建立适合井下实际情况的油管柱振动力学模型和分析计算方法,从而准确掌握井下油管柱的受力、交变载荷、应力、应变的大小与变化规律,为更加准确地进行生产管柱的强度设计和校核、开采方案的选择,提供理论依据。

1.3.2 研究内容

以上述研究目标为主线,本书的主要研究内容如下:

(1) 天然气诱发油管柱振动的机理研究

当天然气在油管柱内流动的激励力的变化频率与油管柱某一阶固有频率接近时,油管柱将发生共振,这将加剧油管柱的破坏。本书以流体力学的基本理论为基础,分析了天然气在油管柱内流动的运动形式,建立了天然气在油管柱内流动的传输方程与运动微分方程,分析了天然气在油管柱内流动时产生旋涡的区域,并给出了旋涡分析的方法。利用流体振荡力学的方法,建立了天然气在油管柱内流动的过程中油管柱的振幅方程,并利用参数多项式方法对天然气振荡流场进行求解。以建立的理论模型为基础对天然气在油管柱内流动可能诱发油管柱振动的油管内径变化、油管弯曲(即轴向受压屈曲、定向井中随井眼的弯曲及井口装置中管汇的弯曲)、节流阀开关处流速变化,以及天然气产量和压力变化等因素进行了定量研究,计算表明天然气流过油管内径变化、油管弯曲、节流阀等处会引起天然气流速、天然气对油管柱作用的压力的变化,而流速和压力的变化将诱发油管柱振动;同时天然气流速的突然变化也将对油管柱产生冲蚀。

(2) 油管柱振动模型的建立

运用现代模态分析理论,以整个油管柱为研究对象,考虑到天然气开采过程中的主要特

点,建立了油管柱在各种工况下的振动方程,分析了油管柱刚度矩阵、质量矩阵的特征方程及其解法,讨论了油管柱各阶振动模态的关系与展开定理,并应用模态叠加法分析了油管柱的模态特性。该模型考虑了引起油管柱振动的主要因素,即:封隔器约束、气井产量、压力、管柱尺寸、复合油管柱、流固耦合等因素。

(3) 油管柱振动固有特性分析

对所建立的油管柱振动方程,运用反幂法与 Lanczos 法求解油管柱振动特性。以川东某构造 14 号井的油管柱为对象,考虑有、无封隔器约束,是否承受压力,计算了油管柱在开采过程中的振动固有特性。对计算结果进行了详细的分析讨论,得出了油管柱固有振动频率、振幅以及振动模态的变化规律。分析在地层压力相同的情况下,天然气产量与油管柱振动特性的关系,分析产量与油管柱的各阶固有频率、振幅的关系。

(4) 油管柱动力响应计算与分析

根据油管柱实际工作状态,提出了利用非线性动力响应分析法对油管柱进行动力响应计算,同时对计算非线性动力响应的各种方法及收敛准则进行了讨论。根据川东某构造 14 号井的基本数据,施加图 2. 13、图 2. 14 所示的天然气对油管柱的激励载荷,利用非线性动态响应分析技术,计算了油管柱在该压力脉动下,油管柱上任一位置的综合应力、响应加速度和速度。对油管柱动力响应计算结果进行了详细的分析讨论,得到了综合响应应力、响应速度和响应加速度的一些变化规律。

(5) 油管柱减震方法探索

在油管柱振动机理与动态应力分析计算的基础上,对减轻油管柱振动的方法进行了初步的探索。首先寻找整个油管柱的最大动态应力的位置,在该位置加一约束(即减震装置),使用油管柱振动模型与动态应力模型进行计算表明,在油管柱的最大动态应力的位置增加约束,可以降低油管柱的固有振动频率并减小振动载荷和油管柱的最大动态应力。然后对减震装置的结构进行初步的设计,给出了减震装置的作用原理图和结构示意图。下一步需要对本文提出的减震方法进行深入的研究,对设计的减震装置进行室内和现场实验。

整个内容的技术路线图及各项研究中,数据之间的相互转换如图 1. 3 所示。

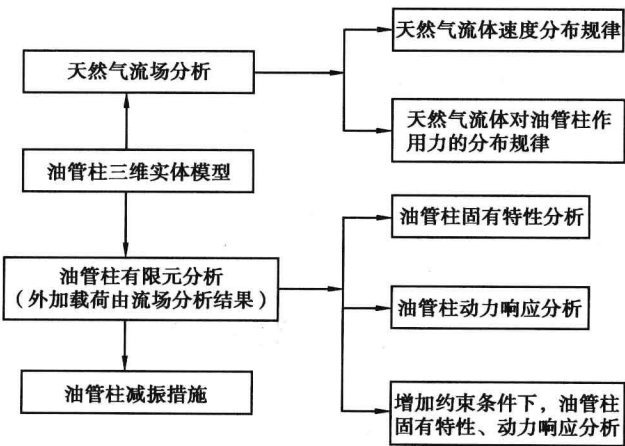


图 1. 3 油管柱振动分析的技术路线图