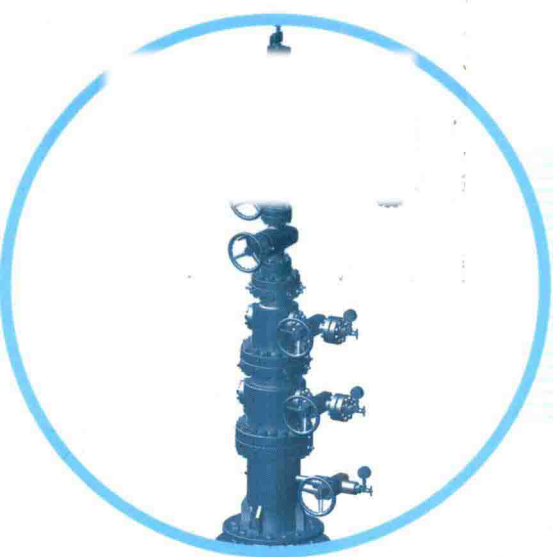




NANBAO TANHAI DAXIEDUJING CAIYOU GONGCHENG JISHU YU SHIJIAN

南堡滩海大斜度井采油工程

技术与实践

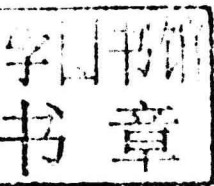
常学军 李良川◎编著



石油工业出版社

南堡滩海大斜度井 采油工程技术与实践

常学军 李良川 编著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统阐述了滩海大斜度井采油工程管杆柱力学和压裂工艺理论认识新进展,滩海低渗透油藏大斜度井采油、压裂与精细注水等开发系列技术,总结了南堡滩海中深层及深层大斜度井中有代表性井的采油工程技术与实践。

本书适合石油与天然气开发行业的科研人员、技术人员、管理人员和石油高等院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

南堡滩海大斜度井采油工程技术与实践 / 常学军,
李良川编著. — 北京: 石油工业出版社, 2017. 3
ISBN 978-7-5183-1737-0

I. ①南… II. ①常… ②李… III. ①大角度斜井—
海上开采—油气钻井 IV. ①TE243

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 042778 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) 64523736

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

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 18.25

字数: 464 千字

定价: 150.00 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

《南堡滩海大斜度井采油工程技术与实践》

编 委 会

主 任：常学军

副 主 任：李良川

委 员：（以姓氏笔画为序）

于洋洋 王 磊 卢军凯 刘晓旭 孙成林

孙宏晶 肖国华 吴 均 宋显民 张立民

张建忠 陈 勉 侯 冰 柳 军

前 言

冀东南堡滩海油田主要采用人工岛（陆域平台）+大斜度丛式井网开发，开发建设平台限制（数量、位置、空间）、地质条件复杂（油层厚度变化大、物性差），大斜度井举升、压裂、分注技术等方面缺少相关的理论指导，也没有成型的技术经验可借鉴，油田开发面临诸多技术难题，如中低产大斜度井举升方式和相关技术配套不完善，现有分注技术工具与工艺不适应大斜度井，大斜度井分层压裂技术不成熟。

“十二五”期间，中国石油冀东油田公司承担并组织实施了国家科技重大专项“渤海湾盆地黄骅坳陷滩海开发技术示范工程”，通过近几年开发试生产过程中的攻关与应用，形成了滩海低渗透油藏大斜度井采油、压裂与精细注水等开发系列技术，解决了滩海复杂断块油气田规模开发所需的举升、压裂、分注等技术问题，摸索出适合滩海大斜度井采油工程的相关理论，现场应用取得良好效果，最大限度实现了滩海低渗透油藏经济有效开发。2016年6月30日经国家相关部门组织验收，一致认为形成的滩海复杂油藏开发集成配套技术已达到国际先进和国内领先水平，对国内滩海油田开发具有重要推广价值和广阔应用前景，意义重大。

鉴于项目形成的技术成果从理论、技术到实践均具有典型的代表性与重要的指导意义，为便于从事油田开发的广大科技工作者了解和掌握，项目组将主要技术成果汇总出版本书。

本书是近年来冀东南堡滩海油田采油技术攻关和开发工作的总结，是广大油田开发工作者的心血和智慧的结晶，经过认真总结提炼并多次修订后完成，旨在能让更多的同行了解相关技术，以期达到互相交流、互相借鉴的目的，共同提高我国滩海油气田开发技术水平。

本书共分五章。第一章和第二章为理论研究；第三章至第五章为滩海大斜度井采油工程技术进展，分举升、压裂、分注等三方面技术系列，力求突出滩海油田大斜度井这一特殊特点。全书总的写作提纲由常学军编纂，包括详细编写提纲、各章节编写要点，第一章由张立民、孙成林、肖国华、柳军、王磊、刘晓旭、张建忠等执笔，第二章由陈勉、侯冰等执笔，第三章由孙成林、于洋洋、王磊、刘晓旭等执笔，第四章由张立民、肖国华、宋显民、张建忠等执笔，第五章由李良川、吴均、卢军凯、孙宏晶等执笔，邀请了中国石油大学（北京）陈勉教授审稿，最后统稿由常学军、李良川完成。

由于编者水平和经验有限，对滩海油田大斜度井采油工程技术的认识与理解可能有不妥之处，敬请读者批评指正。

目 录

第一章 滩海大斜度井采油工程管杆柱力学	(1)
第一节 滩海大斜度井有杆泵系统杆柱力学分析	(1)
一、大斜度井抽油杆柱三维力学模型	(2)
二、大斜度井抽油杆柱力学仿真	(8)
第二节 滩海大斜度井电泵管柱力学分析	(26)
一、大斜度井电泵管柱力学模型	(27)
二、电泵法兰连接螺栓强度校核	(43)
第三节 滩海大斜度井分注管柱力学分析	(46)
一、大斜度井分注管柱力学模型	(47)
二、大斜度井井筒温度场及压力场计算	(58)
三、大斜度井分注管柱力学工程应用	(67)
第二章 滩海大斜度井压裂	(80)
第一节 储层特性、地应力特性	(80)
一、滩海砂泥薄互储层特征	(80)
二、滩海大斜度井压裂难点	(86)
三、滩海储层地应力测试	(91)
四、滩海储层地应力分布规律	(98)
第二节 高温高压砂泥互层岩石力学行为分析	(105)
一、高温高压岩石力学评价	(105)
二、高温高压影响规律分析	(108)
三、岩石结构与力学强度的关系	(112)
第三节 大斜度井水力裂缝起裂、转向扩展延伸数学模型	(113)
一、斜井井壁裂缝起裂模型	(113)
二、斜井裂缝转向扩展模型	(116)
三、斜井水力裂缝转向扩展形态	(117)
第四节 砂泥互层中大斜度井裂缝扩展的数值模拟	(122)
一、砂泥互层储层缝周应力场分布	(122)
二、砂泥互层储层裂缝垂向扩展机理	(129)
三、砂泥互层储层裂缝垂向扩展数值模型	(134)
四、储层组合分层压裂垂向扩展形态	(136)
第五节 大斜度井不同条件下起裂及延伸规律物理模拟实验	(141)
一、斜井真三轴压裂物理模拟实验	(141)
二、射孔完井水力裂缝起裂特征	(142)

三、斜井水力裂缝延伸规律	(144)
四、裂缝扩展形态监测	(154)
第三章 滩海大斜度井举升技术	(157)
第一节 滩海大斜度井有杆泵采油技术及应用	(157)
一、大斜度井有杆泵采油优化设计	(157)
二、大斜度井有杆泵综合防偏磨技术	(165)
三、大斜度井有杆泵采油技术应用	(171)
第二节 滩海大斜度井气举采油技术及应用	(173)
一、大斜度井气举井筒压力温度计算	(173)
二、大斜度井气举采油优化设计	(182)
三、大斜度井气举采油工艺	(185)
四、滩海油田气举采油安全控制技术	(197)
五、大斜度井投捞测试技术	(199)
六、南堡 1-3 人工岛气举采油技术应用	(209)
第三节 滩海大斜度井电泵采油技术及应用	(210)
一、大斜度井电泵采油优化设计	(210)
二、大斜度井电泵采油配套技术	(213)
三、大斜度井电泵采油技术应用	(221)
第四章 滩海大斜度井分层注水技术	(223)
第一节 大斜度井分注管柱及配套工具	(223)
一、分注工艺管柱	(223)
二、分注配套工具	(224)
第二节 大斜度井偏心定量分层配水技术	(227)
一、调配技术与配套工具	(227)
二、验封技术与配套工具	(231)
三、大斜度井偏心定量分层配水技术应用	(233)
第三节 大斜度井同心直读测调配水技术	(233)
一、调配技术与配套工具	(233)
二、验封技术与配套工具	(235)
三、大斜度井同心直读测调配水技术应用	(236)
第五章 滩海低渗透储层大斜度井压裂技术	(238)
第一节 精细分层压裂工具	(238)
一、压裂管柱	(238)
二、配套工具	(240)
第二节 低伤害压裂液技术	(247)
一、压裂液体系评价	(247)
二、低浓度瓜尔胶压裂液技术	(251)
第三节 大斜度井压裂优化设计技术	(254)
一、层段组合技术优化	(254)
二、压裂液体系与支撑剂优化设计	(255)

三、压裂工艺优化	(256)
第四节 压裂配套技术	(259)
一、裂缝监测技术	(259)
二、快速破胶控制放喷技术	(261)
第五节 NP403X1 断块开发压裂技术	(262)
一、油藏地质概况	(262)
二、油藏工程方案	(262)
三、压裂工程方案	(267)
四、现场应用	(278)
参考文献	(280)

第一章 滩海大斜度井采油 工程管杆柱力学

南堡油田属于滩海油田,受地面和地下条件限制,多采用定向井和水平井开采。采油管柱是分注、举升等措施得以实现的工具,是联系地面和地层的重要通道,载荷传递的重要桥梁。由于南堡油田油水井具有造斜点高、井斜角大、水平段长的特点,在这些因素的综合影响下,采油注水管柱在井下受到的力学条件更加复杂。采油工程主要面临以下问题:抽油杆和油管偏磨越来越严重,抽油机杆断、管脱现象增多,油井检泵周期大大缩短;随着泵挂加深以及泵挂处井斜的增大,抽油机悬点载荷增大,机采能耗大幅增高;电泵举升管柱起下难度大且易损伤电缆、工作寿命短;分注管柱在坐封、注水、反洗井等工况条件下,受力状况差异较大,从而导致管柱变形蠕动,使封隔器失效。

为此,开展了大斜度有杆泵井系统力学分析研究、电泵举升管柱下入可行性分析、大斜度注水管柱力学研究,建立了管柱力学分析模型,计算分析任意位置的受力情况(载荷、弯矩和应力等),开发了大斜度井有杆泵系统设计与分析软件、电泵下入可行性分析、大斜度井分注管柱力学分析软件,从而分析大斜度井内管柱、杆柱受力特征、掌握管柱受力状况,指导大斜度井采油注水管柱设计,延长大斜度油井检泵周期,提高注水井分注合格率。

第一节 滩海大斜度井有杆泵系统杆柱力学分析

随着南堡滩海油田开发的不断深入,油井造斜点越来越靠上,井斜越来越大,水平位移越来越长,井眼轨迹越来越复杂,大斜度井呈不断增多的趋势。随着大斜度井逐渐增多,给常规有杆泵举升带来越来越多的挑战,杆管偏磨严重,造成油井检泵周期缩短,增加了作业维护成本,需对这类油井开展杆柱力学分析研究,为大斜度井有杆泵系统优化设计提供理论依据。

杆柱力学分析是有杆抽油系统优化设计的核心和关键内容,国内外学者进行了深入研究。从20世纪60年代S. G. Gibbs建立有杆泵一维动态模拟模型以来,石油工程领域对有杆泵杆柱力学的研究从直井逐步发展到斜井,从一维到三维。杆柱一维力学模型由描述抽油杆柱纵向振动的一维阻尼波动方程、光杆运动边界条件、井下抽油泵工作状况边界条件与初始条件等组成,仅适用于直井、斜直井。Lukasiewicz提出了适用于斜井的二维杆柱力学模型,考虑了杆柱的动力学特性和杆管摩擦力,建立偏微分方程组和相关的边界条件,通过有限差分方法求解。徐俊等提出了斜井有杆抽油系统工况分析的三维模型,建立了杆抽油系统动力学模型的基本方程和数值求解方法,应用微分几何和变分原理,将杆柱的动力学方程表示成一组耦合的偏微分方程以及相应的边界条件,并编制了计算机程序。已有的研究多建立在大量假设条件的基础上,对直井及部分井斜较小的油井有一定的适应性,对于空间结构复杂的大斜度井,由于约束条件多,模型构建与求解较为复杂。三维杆柱力学计算一直是难点,在三维弯曲井眼中,杆、管之间的正压力及摩擦力与所承受的轴力大小有关,有杆泵抽油系统的

动力学微分方程将是一个高阶的非线性偏微分方程组，其数值求解方法也比较复杂。大部分国内外杆柱力学分析软件均未能实现三维力学分析功能，只有美国 THETA 公司开发的 RODSTAR 软件新增加了部分功能，因此，都不能准确地描述抽油杆柱在运动过程中的受力和变形状态。为了准确地计算这类油井抽油杆柱任意截面的受力、形变与运动状态，必须研究三维条件下抽油杆柱力学模型及其求解方法，从而提高抽油杆柱、扶正器以及整个举升系统优化设计的合理性，提高有杆抽油技术的总体水平，并达到节能降耗，提高经济效益的目的。

一、大斜度井抽油杆柱三维力学模型

(一) 三维井眼轨迹描述

以空间直角坐标系及自然坐标系来描述三维井眼微段的空间特征，如图 1-1 所示，井口 P 为原点， i, j, k 分别为直角坐标系中表示沿坐标轴 x, y, z 的单位矢量， τ 为过任一点 O 沿井眼轴线轨迹切线方向的单位矢量； α 为井斜角，rad； φ 为方位角，rad； s 为井眼弧长，m，则：

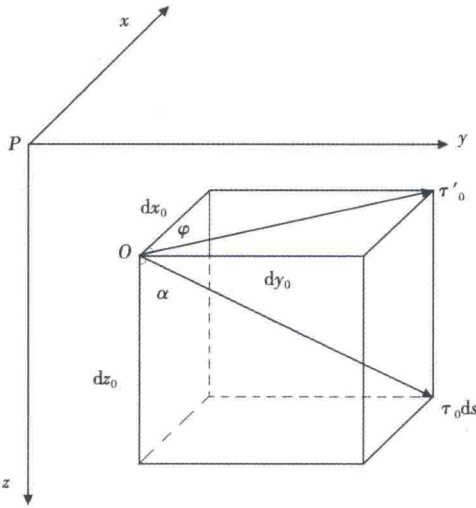


图 1-1-1 空间直角坐标系

$$\frac{dx_0}{ds} = \sin\alpha\cos\varphi$$

$$\frac{dy_0}{ds} = \sin\alpha\sin\varphi$$

$$\frac{dz_0}{ds} = \cos\alpha$$

$$\tau_0 = \sin\alpha\cos\varphi i + \sin\alpha\sin\varphi j + \cos\alpha k \quad (1-1-1)$$

通过在定向井中引入微分几何方法，井眼曲率和井眼扭矩分别为：

$$k_0 = \left| \frac{d\tau_0}{ds} \right|$$

$$T_0 = \frac{1}{k_0^2} \left| \tau_0 \frac{d\tau_0}{ds} \frac{d^2\tau_0}{ds^2} \right| \quad (1-1-2)$$

经简化可以表述为井斜角和方位角的函数：

$$k_0^2 = \left(\frac{d\alpha}{ds} \right)^2 + \sin^2\alpha \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2$$

$$T_0 = \frac{1}{k_0^2} \left\{ \left(\frac{d\alpha}{ds} \frac{d^2\varphi}{ds^2} - \frac{d\varphi}{ds} \frac{d^2\alpha}{ds^2} \right) \sin\alpha + \left[2 \frac{d\varphi}{ds} \left(\frac{d\alpha}{ds} \right)^2 + \sin^2\alpha \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^3 \right] \cos\alpha \right\} \quad (1-1-3)$$

井眼轨迹轴线在 O 点处的主法线和次法线方向的单位矢量分别为：

$$n_0 = \frac{1}{k_0} \frac{d\tau_0}{ds} = \frac{1}{k_0} \left[\frac{d}{ds} (\sin\alpha\cos\varphi) i + \frac{d}{ds} (\sin\alpha\sin\varphi) j + \frac{d\cos\alpha}{ds} k \right] \quad (1-1-4)$$

$$b_0 = \tau_0 n_0 = -\frac{1}{k_0} \left[\sin\varphi \frac{d\alpha}{ds} + \frac{\sin^2\alpha}{2} \frac{d\sin\varphi}{ds} \right] \mathbf{i} + \frac{1}{k_0} \left(\cos\varphi \frac{d\alpha}{ds} + \frac{\sin^2\alpha}{2} \frac{d\cos\varphi}{ds} \right) \mathbf{j} + \frac{\sin^2\alpha}{k_0} \frac{d\varphi}{ds} \mathbf{k} \quad (1-1-5)$$

式中 n_0 ——任一点 O 位置处主法线方向的单位矢量；
 b_0 ——任一点 O 位置处次法线方向的单位矢量；
 τ_0 ——过任一点 O 沿井眼轴线轨迹切线方向的单位矢量；
 k_0 ——任一点 O 位置处的井眼曲率；
 $\frac{d\tau_0}{ds}$ ——井眼轨迹的挠率。

自然坐标系与直角坐标系的变换矩阵为：

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \sin\alpha\cos\varphi & \sin\alpha\sin\varphi & \cos\alpha \\ \frac{1}{k_0} \frac{d}{ds}(\sin\alpha\cos\varphi) & \frac{1}{k_0} \frac{d}{ds}(\sin\alpha\sin\varphi) & \frac{1}{k_0} \frac{d\cos\alpha}{ds} \\ -\frac{1}{k_0} \left(\sin\varphi \frac{d\alpha}{ds} + \frac{\sin^2\alpha}{2} \frac{d\sin\varphi}{ds} \right) & \frac{1}{k_0} \left(\cos\varphi \frac{d\alpha}{ds} + \frac{\sin^2\alpha}{2} \frac{d\cos\varphi}{ds} \right) & \frac{\sin^2\alpha}{k_0} \frac{d\varphi}{ds} \end{bmatrix} \quad (1-1-6)$$

式中 Γ ——自然坐标系与直角坐标系的变换矩阵。

当 $\alpha(s)$ 、 $\varphi(s)$ 已知，便可确定相应井眼轨迹的曲率、挠率以及切线、主法线和次法线方向的单位矢量。由微分几何（Frenet 公式）得：

$$\begin{aligned} \frac{d\tau_0}{ds} &= k_0 n_0 \\ \frac{dn_0}{ds} &= -k_0 \tau_0 + T_0 b_0 \\ \frac{db_0}{ds} &= -T_0 n_0 \end{aligned} \quad (1-1-7)$$

式中 T_0 ——任一点 O 位置处的扭矩；
 $\frac{dn_0}{ds}$ ——主法线方向的单位矢量；
 $\frac{db_0}{ds}$ ——次法线方向的单位矢量。

（二）用三次样条函数描述井斜角和方位角的变化规律

由于实际测得的井眼基本参数是一系列测深离散点所对应的井斜角和方位角，不便于计算，为此用三次样条把井斜角和方位角表达为测深的函数。

设从测深 l_0 开始至测深 l_n 为止，共测得 $n+1$ 个点的测深、井斜角和方位角为：

$$l_0, l_1, l_2, \dots, l_n \\ \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$$

$$\phi_0, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$$

分段函数 $\alpha(l)$ 和 $\phi(l)$ 在区间 $[l_{i-1}, l_i]$ 的表达式分别为:

$$\begin{aligned}\alpha(l) &= \alpha_{i-1} \frac{l_i - l}{h_{i-1}} + \alpha_i \frac{l - l_{i-1}}{h_{i-1}} + [A_i(l - l_{i-1}) + B_i(l - l_i)](l - l_{i-1})(l - l_i) \\ \phi(l) &= \phi_{i-1} \frac{l_i - l}{h_{i-1}} + \phi_i \frac{l - l_{i-1}}{h_{i-1}} + [A_i(l - l_{i-1}) + B_i(l - l_i)](l - l_{i-1})(l - l_i)\end{aligned}\quad (1-1-8)$$

其中:

$$\begin{aligned}h_{i-1} &= l_i - l_{i-1} \\ A_i &= \frac{M_{i-1} + 2M_i}{6h_{i-1}} \\ B_i &= -\frac{2M_{i-1} + M_i}{6h_{i-1}}, \quad \alpha_i = -\frac{m_{i-1} + 2m_i}{6h_{i-1}}\end{aligned}$$

式中 $\alpha(l)$ ——井斜角分段函数;

$\phi(l)$ ——方位角分段函数;

$M_i, m_i, \lambda_i, \mu_i, D_i, d_i$ ——三次样条函数的中间变量。

系数 M_i, m_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) 既与井斜角和方位角的测量值有关, 又与井口和井底的边界条件有关。设井口和井底的井斜角和方位角的一阶导数为常数, 则有:

$$m_0 = m_n = M_0 = M_n = 0$$

若令:

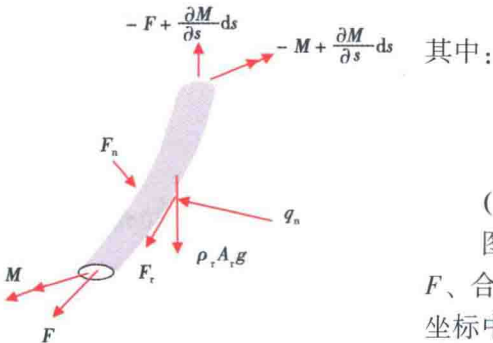
$$\begin{aligned}h_i &= \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i} \\ \lambda_i &= 1 - \mu_i\end{aligned}\quad (1-1-9)$$

则 M_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) 满足:

$$\mu_i M_{i-1} + 2M_i + \lambda_i M_{i+1} = D_i \quad (1-1-10)$$

其中, m_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) 满足:

$$\mu_i m_{i-1} + 2m_i + \lambda_i m_{i+1} = d_i \quad (1-1-11)$$



$$d_i = \frac{6}{h_{i-1} + h_i} \left(\frac{\phi'_{i+1} - \phi'_i}{h_i} - \frac{\phi'_i - \phi'_{i-1}}{h_i} \right)$$

(三) 受力分析及模型建立

图 1-1-2 列出了模型中所有考虑的力, 包括合力 F 、合力矩 M 以及任意测量深度 s 处的分力 q 。在自然坐标中, 可用下列方程很方便地将这些向量分解成它们的分量:

图 1-1-2 杆柱单元受力分析示意图

$$\begin{aligned}
 W &= \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \\
 F &= \begin{bmatrix} f_r \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \\
 M &= \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{1-1-12}$$

式中 W ——杆柱的位移矢量；

f_r ——轴向力；

Q_2, Q_3 ——剪切力；

M_1 ——扭矩；

M_2, M_3 ——弯矩。

在直井中，分力包括重力 $\rho_r A_r g$ 、黏滯力 F_{rf} 和惯性力 $\rho_r A_r \partial U / \partial t$ ；在斜井中，还有额外考虑：杆管边界力 q_n 和杆管摩擦力 F_{r} ，这些分力可在自然坐标中解出：

$$q = \begin{bmatrix} -\rho_r A_r \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho_r A_r g \cos \alpha + F_{\text{rf}} + F_{\text{r}} \\ -\rho_r A_r \frac{\partial u_2}{\partial t} + \frac{\rho_r A_r g \sin \alpha}{K} \frac{d\alpha}{ds} + q_{n2} \\ -\rho_r A_r \frac{\partial u_3}{\partial t} + \frac{\rho_r A_r g \sin^2 \alpha}{K} \frac{d\phi}{ds} + q_{n3} \end{bmatrix} \tag{1-1-13}$$

对杆柱单元采用虚功原理分析，建立内力和位移的关系：

$$\delta \varepsilon_{11} = \frac{\partial \Delta w_1}{\partial s} - K \Delta w_2 \tag{1-1-14}$$

$$\delta k_2 = -\frac{\partial^2 \Delta w_3}{\partial s^2} - \tau \frac{\partial \Delta w_2}{\partial s} \tag{1-1-15}$$

$$\delta k_3 = \frac{\partial^2 \Delta w_2}{\partial s^2} - \tau \frac{\partial \Delta w_3}{\partial s} \tag{1-1-16}$$

式中 $\delta \varepsilon_{11}, \delta k_2, \delta k_3$ ——杆柱的虚变形；

$\Delta w_1, \Delta w_2, \Delta w_3$ ——杆柱的虚位移，虚位移原理的公式如下：

$$\int_s (f_r \delta \varepsilon_{11} + M_2 \delta k_2 + M_3 \delta k_3) ds = \sum P_i \Delta d_i \tag{1-1-17}$$

式中 δ ——变量符号；

P_i ——作用在杆柱单元上的外力；

Δd_i ——外力导致的杆柱虚位移。

式 (1-1-17) 应用到杆柱单元中可以得到一组杆柱在斜井中运动的方程。将式 (1-1-14) 至式 (1-1-16) 代入式 (1-1-17), 然后积分化简得到下列方程:

$$\frac{\partial f_r}{\partial s} + q_1 = 0 \quad (1-1-18)$$

$$Kf_r - \frac{\partial^2 M_3}{\partial s^2} - \tau \frac{\partial M_2}{\partial s} + q_2 = 0 \quad (1-1-19)$$

$$\frac{\partial^2 M_2}{\partial s^2} - \tau \frac{\partial M_3}{\partial s} + q_3 = 0 \quad (1-1-20)$$

式中 q_1, q_2, q_3 ——重力在 x, y, z 三个方向的分力;

K ——井眼曲率;

τ ——井眼挠率。

最后, 通过将式 (1-1-13) 代入式 (1-1-18) 至式 (1-1-20) 和关于时间的微分方程 [式 (1-1-17)], 可以得到一组新的模拟杆柱在斜井中运动的偏微分方程:

$$\rho_r A_r \frac{\partial u_{r1}}{\partial t} = \frac{\partial f_r}{\partial s} + \rho_r A_r g \cos \alpha + F_{rf} + F_{cf} + F_{rt} \quad (1-1-21)$$

$$\frac{1}{A_r E_r} \frac{\partial f_r}{\partial t} = \frac{\partial u_{r1}}{\partial s} - K u_{r2} \quad (1-1-22)$$

$$\rho_r A_r \frac{\partial u_{r2}}{\partial t} = Kf_r - \frac{\partial^2 M_3}{\partial s^2} - \tau \frac{\partial M_2}{\partial s} - \frac{\rho_r A_r g}{K} \frac{d\alpha}{ds} \sin \alpha + q_{n2} \quad (1-1-23)$$

$$\frac{1}{E_r I_r} \frac{\partial M_2}{\partial t} = - \frac{\partial^2 u_3}{\partial s^2} - \tau \frac{\partial u_2}{\partial s} \quad (1-1-24)$$

$$\rho_r A_r \frac{\partial u_{r3}}{\partial t} = \frac{\partial^2 M_2}{\partial s^2} - \tau \frac{\partial M_3}{\partial s} - \frac{\rho_r A_r g}{K} \frac{d\phi}{ds} \sin^2 \alpha + q_{n3} \quad (1-1-25)$$

$$\frac{1}{E_r I_r} \frac{\partial M_3}{\partial t} = \frac{\partial^2 u_2}{\partial s^2} - \tau \frac{\partial u_3}{\partial s} \quad (1-1-26)$$

式中 ρ_r ——抽油杆密度, kg/m^3 ;

A_r ——抽油杆截面积, m^2 ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

F_{rf} ——杆液摩擦力, N ;

F_{rt} ——抽油杆油管之间的摩擦力, N ;

F_{cf} ——抽油杆接箍和井液之间的摩擦力, N ;

u_{r1}, u_{r2}, u_{r3} ——抽油杆在 x, y, z 三个方向上的速度, m/s ;

E_r ——抽油杆的弹性模量, MPa ;

I_r ——惯性矩, m^4 ;

u_1, u_2, u_3 ——抽油杆在 x, y, z 三个方向上的相对速度, m/s ;

q_{n2} ——主法向上的侧向力, N;

q_{n3} ——副法向上的侧向力, N。

杆管摩擦力或者抽油杆导向器与油管之间的摩擦力 F_{r} 为库仑摩擦力, 描述为:

$$|F_{\text{r}}| \leq \frac{u_{\text{r}}}{|u_{\text{r}}|} \lambda |q_{\text{n}}| \quad (1-1-27)$$

式中 λ ——库仑摩擦系数。

式 (1-1-27) 说明杆管摩擦力与侧向力成比例, 方向与杆柱运动的方向相反。该式也适用于杆柱静止时的情况。

在斜井有杆泵系统中, 流体方程的推导要比杆柱方程的推导简单些, 只需对直井中的流体方程稍做修改即可得到斜井中流体的控制方程:

$$\frac{\partial p_{\text{f}}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{f}} u_{\text{f}})}{\partial s} = 0 \quad (1-1-28)$$

$$(A_{\text{t}} - A_{\text{r}}) \left[\frac{\partial(\rho_{\text{f}} u_{\text{f}})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{f}} u_{\text{f}}^2)}{\partial s} \right] = - (A_{\text{t}} - A_{\text{r}}) \frac{\partial P_{\text{f}}}{\partial x} + \rho_{\text{f}} g (A_{\text{t}} - A_{\text{r}}) \cos \alpha - F_{\text{rf}} - F_{\text{cf}} - F_{\text{ft}} \quad (1-1-29)$$

式 (1-1-21) 至式 (1-1-29) 可以建立斜井中杆柱和流体运动的控制方程, 式 (1-1-21)、式 (1-1-22) 描述了杆柱的纵向运动方程, 式 (1-1-23) 至式 (1-1-29) 描述的是杆柱的横向运动方程和流体运动方程。

抽油机地面边界条件可由 Gary 方程给出。这些方程不仅可以描述常规抽油机系统, 而且可以描述那些几何改进的抽油机系统。最后, 有杆泵井下边界条件通过模拟诸如流体完全充满、油管未锚定、液击、卡泵以及气体干扰等特定的案例得到。

如果井眼是垂直的 (方位角 $\phi = 0$, 转矩 $\tau = 0$, 曲率 $K = 0$), 那么式 (1-1-21) 至式 (1-1-29) 仍然适用并可简化为:

$$\rho_{\text{r}} A_{\text{r}} \frac{\partial u_{\text{r}}}{\partial t} = \frac{\partial f_{\text{r}}}{\partial x} + \rho_{\text{r}} A_{\text{r}} g + F_{\text{rf}} + F_{\text{cf}} \quad (1-1-30)$$

$$\frac{\partial f_{\text{r}}}{\partial t} = A_{\text{r}} E_{\text{r}} \frac{\partial u_{\text{r}}}{\partial x} \quad (1-1-31)$$

$$(A_{\text{t}} - A_{\text{r}}) \frac{\partial \rho_{\text{f}} u_{\text{f}}}{\partial t} = - (A_{\text{t}} - A_{\text{r}}) \frac{\partial \rho_{\text{f}} u_{\text{f}}^2}{\partial x} - (A_{\text{t}} - A_{\text{r}}) \frac{\partial P_{\text{f}}}{\partial x} + \rho_{\text{f}} g (A_{\text{t}} - A_{\text{r}}) - (F_{\text{rf}} + F_{\text{cf}} + F_{\text{ft}}) \quad (1-1-32)$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{f}}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{f}} u_{\text{f}})}{\partial x} = 0 \quad (1-1-33)$$

式中 u_{f} ——流体速度, m/s;

ρ_{f} ——流体密度, kg/m^3 ;

A_{t} ——油管内截面积, m^2 。

式 (1-1-30) 至式 (1-1-33) 与 Doty 和 Schmidt 建立的直井模型方程是一样的。

需要重点指出的是流体与抽油杆、油管、接箍之间的黏滞摩擦力 F_{rf} 、 F_{ft} 、 F_{cf} 的计算必

须既适用于层流又适用于紊流，最后联立方程建立综合模型。引入一组转换变量将控制方程转化为一组标准方程，通过有限差分方法对该标准方程进行数值求解。

(四) 边界条件

1. 力边界条件

(1) 作用在抽油杆柱上端面的集中外力：

$$f_s(s) = -f_s(t)\tau_c \quad (1-1-34)$$

式中 $f_s(t)$ ——抽油机提供的抽油杆柱悬点载荷，N。

(2) 作用在抽油杆柱变截面处的集中外力：

$$f_c(s) = -\rho_0 g l_v (A_u - A_d) \tau_c \quad (1-1-35)$$

式中 l_v ——变截面处垂深，m；

A_u, A_d ——分别为变截面处上、下抽油杆柱的横截面积， m^2 ；

τ_c ——端面切向的单位分量。

(3) 作用在抽油杆柱下端面的集中外力：

$$f_d(s) = \begin{cases} (F_c + F_l - F_p) \tau_c \\ - (F_c + F_v) \tau_c \end{cases} \quad (1-1-36)$$

式中 F_c ——泵柱塞与泵筒间的摩擦力，N；

F_v ——液体通过游动阀的阻力，N；

F ——液体作用在柱塞上的力，N；

F_p ——抽吸压力对柱塞底部的作用力，N。

2. 初始条件

在抽油过程中，抽油杆柱做周期往复运动，设初始时刻的位移及速度相同，此初始条件可表达为：

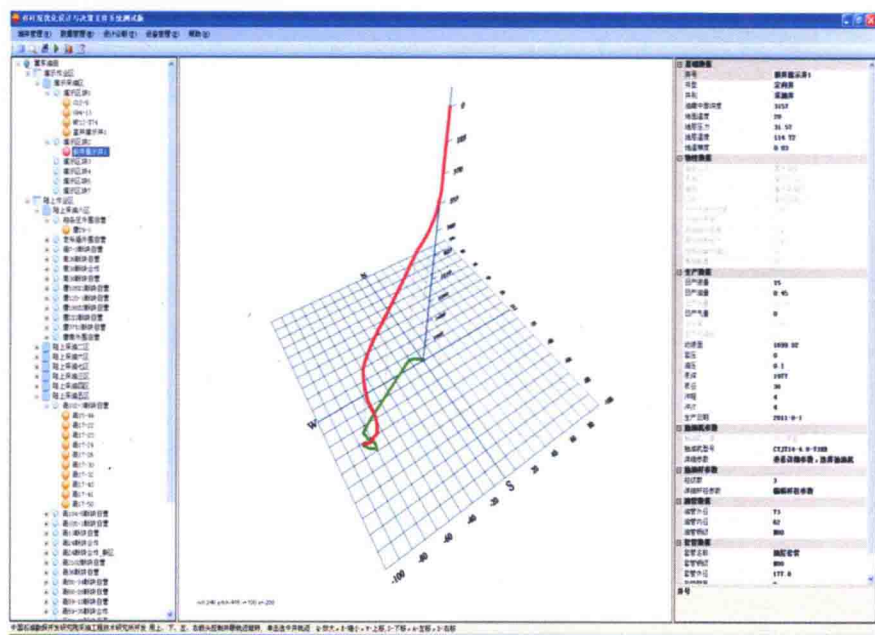
$$u(l, 0) = \frac{\partial u}{\partial t}(l, 0) = \bar{u}(l) \quad (1-1-37)$$

二、大斜度井抽油杆柱力学仿真

(一) 大斜度井有杆泵系统优化设计软件开发

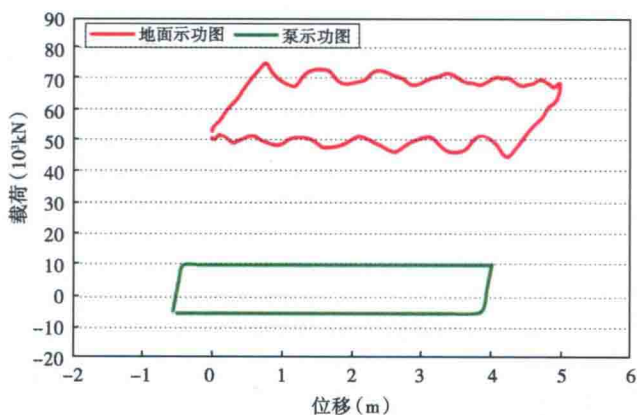
目前，国内外有多套用于油气井生产系统优化设计方面的软件，除了美国 THETA 公司开发的 RODSTAR 软件新增加了部分功能外，PIPESIM、Peoffice、江苏杆柱动态分析软件 RD、优化抽油机井系统设计软件 OPRS 等软件均未完全实现三维力学分析功能，因而无法准确地描述抽油杆柱在运动过程中的受力和变形状态，造成杆管偏磨机理分析不清、扶正器安放间距需进一步优化。因此，大斜度井抽油杆三维力学模型开发的大斜度井有杆泵系统优化设计软件（图 1-1-3），可对大斜度井进行抽油设备（机、杆、泵）的优化和抽汲参数（泵径、冲程、冲次）的优选，可以计算一个冲程周期内不同时刻抽油杆杆柱侧向力大小和方向动态的变化，可以准确预测地面示功图和泵示功图，能够大大提高大斜度井有杆泵系统优化设计水平、延长检泵周期、提高系统效率。

一大斜度井有杆泵系统优化设计软件可对大斜度井进行三维力学分析与优化设计，具体



功能包括：

(1) 根据油井数据, 求解三维杆柱动力学模型, 计算泵示功图和地面示功图, 为有杆泵井科学设计提供精确的动力学分析, 如图 1-1-4 所示。



(2) 计算各级杆的轴向力情况, 进行抽油杆柱强度校核, 求应力范围比, 如图 1-1-5 所示。

(3) 计算一个冲程周期内不同时刻抽油杆杆柱的侧向力, 掌握杆柱受力状态, 为扶正器间距优化设计提供依据, 如图 1-1-6 所示。

(4) 基于油藏井筒一体的设计理念, 抽油机井的优化设计可进行抽汲参数(泵径、冲程、冲次)的优化和抽油设备(主要指杆柱结构)的优选, 如图 1-1-7 所示。