

钻柱 运动学与动力学

章扬烈 著

石油工业出版社

L. 4

钻柱运动学与动力学

章扬烈 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书作者生前在钻柱运动学与动力学方面做了大量的实验、研究工作,取得了丰硕的成果,提出了许多很有见地的观点,受到了国内外同行的关注和重视。本书即是作者在钻柱运动学与动力学方面几十年科研成果的系统总结。

本书适用于从事石油机械研究、制造及石油钻井的科研人员阅读,对于石油院校相关专业的师生也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

钻柱运动学与动力学/章扬烈著.

北京:石油工业出版社,2001.5

ISBN 7-5021-3346-1

I. 钻…

II. 章…

III. ①钻柱—运动学

②钻柱—动力学

IV. P634.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 20213 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 4.25 印张 106 千字 印 1—1000

2001 年 5 月北京第 1 版 2001 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3346-1/TE·2506

定价: 12.00 元

序

钻柱力学是钻井工艺和技术的重要理论基础。章扬烈同志几十年来一直从事钻柱运动学与动力学研究，取得了多方面的研究成果，特别是他首次发现了在钻井过程中，有时会出现沿井壁反方向的公转，这种反转运动的存在，常是导致钻柱疲劳损坏的主要原因。这个结论受到美国石油学会（API）的关注和重视。《钻柱运动学与动力学》一书就是章扬烈同志多年来研究成果的系统总结，本书的出版不仅丰富了钻柱力学理论研究，而且对指导科学钻井也是很有现实意义的。

不幸的是，在本书尚未出版时，章扬烈因病去世，但他在科学研究中的那种锲而不舍、百折不挠的钻研精神和实事求是的科学态度，将永远留在我们的心中，为衷心悼念作者，特为之序。

李相 赵国珍

2000年11月

前 言

建国以来，我国的石油工业获得飞速发展，钻采工艺和设备的技术革新更是日新月异。随着科技工作的纵深发展，实践中长期制约钻采技术发展的的问题就显得特别突出而严重，亟待科技工作者为之共同奋斗。

旋转钻柱各种部件的大量疲劳失效是众所周知的，而且往往失效位置大多在纵向负荷和扭矩负荷最小的部位上，这个谜在国内外迟迟未能揭开。钻杆和钻铤的低寿命导致其大量的消耗，据估计，我国每年须用数亿元人民币的外汇进口各种规格的这类管件，这是一项相当巨大的费用。

一口 3000m 井中的 127mm 的钻杆柱价值近百万元，它是由 300 多根钻杆和钻铤用螺纹连接而成，任何地方发生断裂都会造成严重的后果，甚至使所钻的井报废。美国的统计和估算表明，钻杆柱断裂事故在 14% 的井上发生，平均每发生一次损失 106000 美元，这是正常消耗以外的巨额开支。再者，随着浅层资源的不断枯竭，今后会越来越多地钻深井、超深井，于是钻杆柱的安全可靠性就成为摆在人们面前一个突出课题。

认识井下钻柱工作状态最可信的方法是矿场井下实测，但费用高、难度大。人们早已能够对上天的卫星精确遥控，可井下旋转钻柱动力参数的实测至今仍是一大

难题。该项技术滞后的关键就是没有简单经济的信息通道。国际上研究井下信息通道已经几十年了，但至今尚未突破，这也就是为什么人们至今对钻柱仍知之甚少的根本原因。

世界上有意义的井下振动实测主要有两次：第一次是在 1964~1966 年期间由 Esso Production Research 公司用井下磁带机获得的，然而，两年的实测仅仅证明了：①跳钻、蹩钻存在；②钻柱的弯曲应力频率与转盘转速不一定相等。第二次是 1984 年由 NL Industries Inc. 公司用有导线钻杆进行的，其结果为：①证明了钻柱反转运动的存在；②从实测中找到反转转速与弯曲应力频率间的关系；③提供了纵振与横振并无直接联系的波形图。两次相隔 20 年，代价巨大，而真正得到的认识确实太少了。

退一步讲，即使有足够的资金采用全尺寸钻柱在实际的井中进行研究，由于其井筒尺寸不规则，井底也不具有固定规则的波形，钻柱的尺寸还经常变化，实测数据必定千变万化，无法互相比较，怎么可以指望由这些实测数据能对钻柱的工作状态得出系统的认识呢？因此可以说，想要通过井下实测完成这类研究当前并无可能。

事实表明，用缩小的钻柱模型进行模拟实验研究完全能避免矿场实测存在的重大缺陷。研究中可采用规则的波状井底，可以通过改变某一参数：如波状井底高差、转速、钻压、环隙、减振器的弹簧常数等，而其它参数不变，使所得的数据可以互相比较。同时，该法可

以大大拓宽实验研究的范围，更全面地探索钻柱工作时的内在规律。更突出的优点是：操作简单，直观可靠，费用极省，这是当前认识井下钻柱的最佳途径。

20 世纪 60 年代初，作者在模拟实验中首先发现：钻柱在自转的同时，会出现沿井壁反时针方向的公转，这是一种自激横向振动。这种反转运动在 1984 年才被美国矿场井下实测所证实。为探明究竟，把钻杆柱转变为整个钻井设备中一个安全可靠的环节，20 世纪 80 年代在兰州石油机械研究所建立了模拟实验装置，对具有反转运动钻柱的运动学和动力学进行了系统的研究，证实反转运动确是引起钻柱频繁失效和井下各种不良后果的最为主要的因素，较完整地探明了钻柱横振、扭振及纵振的产生机理，相互关系，造成的危害及消除方法。

本书阐述了该基础研究的主要结果，并结合国内外的实践和国外的矿场实测作了验证。对许多问题（如钻柱和单根钻杆有无横向共振、采用大钻铤是否合理、阶梯形钻柱易疲劳失效的原因、钻柱在小环隙井中工作是否更安全、蹩钻是不是扭转共振等）的看法不同以往，很好地回答了实践中长期存在的疑难问题，构成了自己的独立体系，并为钻井实践提供了“钻柱剧烈振动的判断与控制方法”。

钻杆柱（包括钻头）应是一根只绕自身轴线运动的软轴，应能在高转速下长期可靠地工作，弯弯曲曲的井筒不对它的使用寿命产生明显的不良影响，这是模拟研究得出的关键结论。

目 录

第一章 旋转钻柱的运动原理	(1)
第一节 不同观点的回顾	(1)
第二节 模拟实验装置	(2)
第三节 旋转钻柱的运动状态与实质	(3)
第四节 钻柱反转时的变形与受力	(11)
一、钻杆接头与井壁间的摩擦力	(11)
二、钻柱的螺线变形与转角差	(12)
三、钻柱的扭矩	(13)
四、旋转钻柱的交变弯曲应力	(14)
第五节 钻柱的反转运动普遍存在	(22)
第六节 反转运动的危害	(25)
第二章 钻柱的动力学	(30)
第一节 反转运动引起的弯曲应力	(30)
一、单根钻杆的横向振动与应力分析	(30)
二、单根钻杆的实际工作状态	(46)
三、阶梯形钻柱中钻杆的应力	(58)
四、一个应予纠正的概念	(66)
五、钻杆失效与反转运动的关系	(67)
六、钻柱应是软轴	(69)
七、地质金刚石岩心钻探时钻柱的强烈振动	(72)
八、消除反转的途径	(74)
第二节 钻柱的扭转振动与共振	(75)
一、无反转的钻柱	(75)

二、有反转的钻柱·····	(76)
三、纵向减振器的作用·····	(76)
四、蹩钻·····	(76)
五、蹩钻的一个显著特征·····	(80)
六、频繁的下部钻具组合失效问题·····	(81)
七、钻杆失效与扭振的关系·····	(82)
第三节 纵向振动·····	(82)
第四节 涡轮钻井中钻柱的纵向共振·····	(85)
第三章 钻头的纵振与减振 ·····	(89)
第一节 牙轮钻头与井底关系的基本原理 ·····	(90)
一、临界受迫纵振频率·····	(91)
二、钻头钻压的变化·····	(93)
第二节 模拟实验方法 ·····	(96)
第三节 减振器使用效果的研究与分析·····	(96)
一、减振器对高频小位移纵振的响应·····	(96)
二、减振器对低频大位移纵振的响应·····	(97)
第四节 液压减振器 ·····	(102)
一、纵向液压减振器 ·····	(102)
二、双向减振器 ·····	(103)
第五节 减振器的应用 ·····	(108)
一、减振器的适应刚度及应用范围 ·····	(108)
二、合理使用的几个问题 ·····	(108)
三、过去减振器发展不快的原因 ·····	(109)
四、发展减振器的重要意义 ·····	(110)
第四章 钻柱剧烈振动的判断与控制 ·····	(112)
第一节 问题的提出 ·····	(112)
第二节 钻柱剧烈振动的判断与控制方法 ·····	(113)
一、反向晃振(自激横振) ·····	(113)

二、蹩钻	(114)
三、跳钻	(115)
四、纵向共振（钻柱不旋转）	(116)
参考文献	(117)

第一章 旋转钻柱的运动原理

第一节 不同观点的回顾

自 20 世纪 50 年代起，关于钻柱的运动原理主要有以下两种论点：一种认为，钻柱在井下工作时一般只绕其自身的轴线旋转，这样，耗于钻柱与井壁之间摩擦所用的能量最少^[1]。按照这一观点，钻柱旋转时的离心力对其弯曲变形自然不会产生影响，故美国科学家鲁宾斯基认为，进行转盘钻井与采用井底动力机时钻柱的应力状态并无明显差别，所不同的是在转盘钻井时，由于钻柱绕自身轴线旋转，其受压弯曲部分会产生交变弯曲应力。以前苏联专家萨尔基索夫为代表的另一种观点认为，无论钻柱是在空转还是在钻井，离心力会对钻柱轴线的失稳和弯曲变形产生影响，在压力、拉力、离心力和扭矩的联合作用下，钻柱轴线弯曲成平面正弦曲线形状，其半波波长沿钻柱逐渐变化，并整个轴线按转盘的旋转方向和转速旋转。

按照第一种观点，钻柱只有弯曲部分会出现交变应力而产生疲劳失效，并与井壁接触的钻柱外径会产生均匀磨损；按照第二种观点，钻柱弯曲部分不应产生交变应力，与井壁接触的钻杆接头外径一般只产生偏磨。分析观察钻柱的磨损和损坏发现，钻柱断裂（不论受拉段还是受压段）更多的是疲劳失效，钻杆接头则大多均匀

磨损但有时出现偏磨。另外，实践还表明，随着转速的增加，消耗于空转钻柱的扭矩或钻柱的功率亦为之增加，它反映出离心力对钻柱有很大的影响。这一切说明，上两种观点中的哪一种都难以圆满地解释钻柱使用中的种种现象，故有些人认为，在同一井中工作的钻柱可以出现绕自身轴线旋转，也可以出现绕井轴线旋转，以何种耗功率最小而变，这是过去颇为普遍的看法。

20 世纪 60 年代初期，作者在莫斯科石油与天然气工业学院的研究和 20 世纪 80 年代以来作者在兰州石油机械研究所对不同尺寸的钻柱模型进行的转盘钻井模拟实验，发现了钻柱在自转的同时也绕井轴线进行反转，由此产生了新的钻柱运动原理。

第二节 模拟实验装置

钻杆柱模拟实验装置是按照相似理论进行设计和建造的钻杆柱模型，可直接在地面上对它的运动状态和动力状态进行观察和测量。

模拟实验中将牙轮钻头轮齿引起的高频小位移纵振和波状井底引起的低频大位移纵振分开研究，以分别了解钻柱对这两种振动的不同响应。两者叠加就是钻头实际的受力状态。

扭振和低频大位移的纵振是以牙轮钻头在波状井底上滚动来激发的。无齿滚轮被用来作为钻头。波状井底用淬火钢制作，它具有等高并近于规则的正弦波表面。各个井底的高差不同，可模拟 0.6~1.3cm 实际井底。

该值与井下实测的钻头纵向位移和取出的井底岩心分析结果相符，达 $0.63 \sim 1.27\text{cm}$ ($1/4'' \sim 1/2''$)^[2]。

运动学研究时，采用模拟 89mm 和 168mm 钻杆的钻杆模型。

动力学研究时，又建立了一台单根钻杆的模拟实验装置。该装置可以使钻杆在更高的自转转速和更高的反转转速下工作，可以单独研究反转和自转，也可以研究反转与自转同时存在时钻杆的应力状态，还可以研究不同环隙和拉、压载荷对钻柱弯曲应力的影响。这样的特性弥补了钻杆柱实验装置的不足，使我们得以探索高转速和复杂工况下钻杆内部的应力状态。两实验装置均采用模拟 9m 长的 127mm 钻杆的钻杆模型，并使用计算机采集和处理全部测量数据。

用不同弹簧常数的减振器模型做了一系列实验，以了解减振器对钻柱振动和钻头工作的影响。

第三节 旋转钻柱的运动状态与实质

模拟实验表明，当钻柱在井内以转盘的转速按顺时针方向绕自身轴线旋转时，由于离心力的作用，除钻柱上部和下部很短一段由于钻柱本身刚性没有贴至井壁外，钻杆柱各个接头均贴向井壁，在钻柱与井壁间摩擦力 F 的作用下，整个弯曲钻柱各个接头将会以各自所处的条件，以一定的速度按反时针方向绕井的轴线旋转 (backward precession)，以下简称反转运动，其原理就像转动的车轮能在平地上以一定的速度 V_c 向前运动一

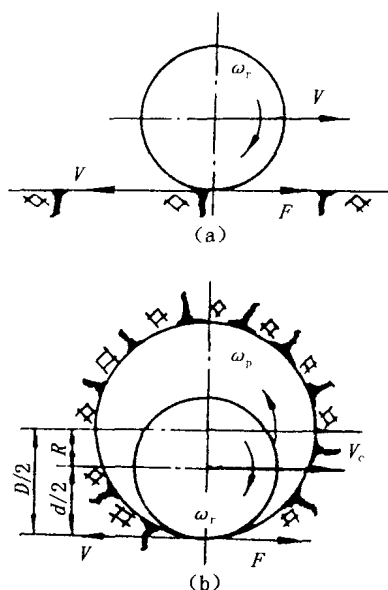


图 1-1 钻柱反转运动原理图

样 (图 1-1 (a)), 只不
过后者的地平面被代之以
筒形井壁 (图 1-1
(b))。

当钻杆接头沿井壁作
纯滚动 ($V_c = V$) 时,
钻杆的反转角速度与转盘
角速度之间有如下关系:

$$\begin{aligned}\omega_p &= [d/(D-d)]\omega_r \\ &= \beta\omega_r\end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned}n_p &= [d/(D-d)]n_r \\ &= \beta n_r\end{aligned}\quad (1-1)$$

$$\beta = d/(D-d) = d/2R$$

式中 d ——回转体的外径, m;

D ——井筒直径, m;

R ——回转体贴井壁反转时的回转半径, m;

ω_p ——钻柱的反转角速度 (角频率), rad/s;

n_p ——钻柱的反转转速, r/min;

ω_r ——钻柱的自转角速度 (角频率), rad/s;

n_r ——钻柱的自转转速, r/min;

β ——回转体的直径与双面环隙的比值。

对钻柱模型在不同的井中的运动进行观察后发现:

(1) 钻柱的反转运动无论是空转时还是钻井过程中，在受压段和受拉段均会出现；

(2) 环隙愈小，转盘转速愈高，愈容易出现反转运动；

(3) 钻杆接头反转运动的轨迹一般说来不是圆形，它时刻改变而且不具有一定的规律性。钻杆接头并不总是与井壁保持接触，常常有跳离和敲击井壁的现象。转盘转速愈高，接头与井壁间的环隙愈小，敲击愈加严重。

钻柱的这种反转运动并非意外现象，文献中早就叙述过这样的例子（见图 1-2）：一根垂直安装的悬臂长轴上面有一重物 A，长轴被电动机 B 带动，C 为间隙较大的导孔。实践证明，当转轴保持直线并且不接触导孔 C 时，机器转动很稳定；一旦由于某种原因或由于失稳使轴与导孔接触（如图 1-2 (b)），此时由于摩擦力 F 的作用会使轴产生与回转方向相反的晃振（back whirl）。重物 A 的离心作用是保持摩擦力 F 并维持这种运动的源泉，这样就产生了持续的

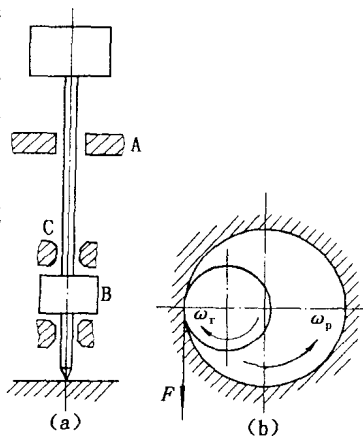


图 1-2 自激晃振的实例

自激晃振运动^[3]。对于钻柱来说与此十分相似，所不同的是其长度更长，且每一个钻杆接头处都有一个导孔，所以它是一种多支点的自激晃振（self-excited whirling at multiple contact points）。

长钻杆柱极易因旋转而产生失稳。据计算，一根长为 1000m 的 114mm 的钻杆柱（下部接上长 40m 的 146mm 钻铤），其失稳的临界转速仅为 1.47r/min。所以钻柱的反转运动是合乎规律的现象^[4]。

（4）反转运动的特征及各种因素对它的影响：

①反转运动的特征：

公式（1-1）表明，理论上钻柱反转转速 n_p 应与转盘转速 n_r 呈线性关系，但实际钻柱的反转转速并不完全按照式（1-1）所表达的关系变化。图 1-3 给出了 89mm 钻杆柱模型空转时 n_p 与 n_r 的关系曲线，图中虚线表示理论计算值，实线为实测曲线。由该图可看出，随着 β 值的增大，实际反转转速偏离理论计算值愈大，也就是说，实际钻柱的运动是带滑动的滚动。由该图还可以看出，当 β 值较高（ $\beta = 2.25 \sim 5.10$ ）时，存在着某个转盘转速，以这个转速来转动钻柱时，钻柱的反转转速符合式（1-1）表示的计算值（即实测曲线与直线的交点）。而当转盘转速小于该转速时，实际反转转速大于理论值，当转盘转速大于该值时，实际反转转速小于理论值。这种现象可认为是：当转盘转速低于该值时，由于离心力不大，钻杆接头不时地跳离井壁，从而缩小了钻柱绕井轴线旋转的回转半径，而使其反转转速高于理论值；当转盘转速高于该值时，由于离心力增大，摩擦阻力增加，又角速度过高，出现了较强的接头敲击井壁的现象，井壁对钻柱的冲击反弹力阻止了反转运动，故此时之反转转速低于理论计算值。这个解释也可以从图 1-3 中低 β 值时钻柱的反转运动得到证明，

当 $\beta = 0.486$ 时, 其 n_p 与 n_r 关系的变化在所测的转速范围内就不具上述的特征, 而与理论计算值接近。

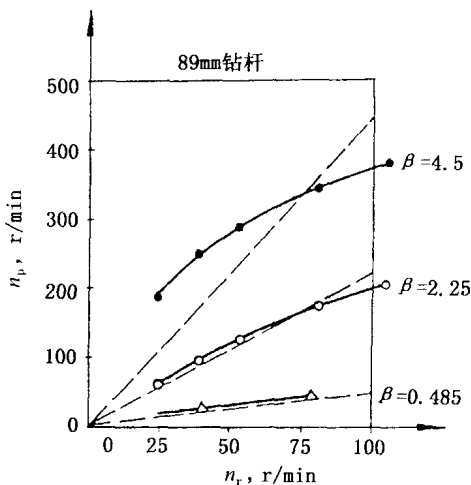


图 1-3 钻柱反转转速与转盘
转速间的关系曲线

影响钻杆接头反转转速使之偏离理论值的因素有: 钻杆高速冲击井壁时的反弹力, 钻井液对反转钻柱的阻力, 接头与井壁间的摩擦力以及相邻接头的运动状况等。

应当指出, 沿整个钻柱各个钻杆接头的反转转速并不是一个稳定值, 它有一个变化范围, 试验表明, 当 $\beta = 4.5$ 时, 这个变化范围可达钻柱平均反转转速的 $\pm 20\%$, 而且, 对于每一个钻杆接头来说, 随时间不同其反转转速也在变化, 因此, 如图所示的在一定 n_r 下的 n_p 值均系各个接头在所测时间间隔内反转转速的算术平均值。各钻杆接头反转转速不稳定的原因主要是: