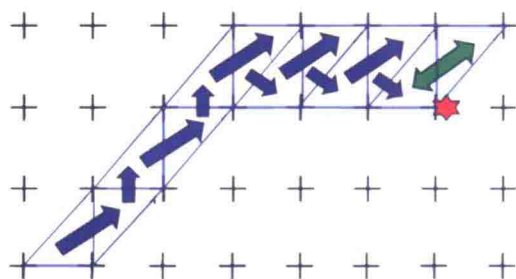


最优化



钻井理论基础与计算 (第二版)

郭学增 编著



石油工业出版社

最优化钻井理论基础与计算

(第二版)

郭学增 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

最优化钻井技术历经多年的实践,已经走向成熟,成为当今钻井技术的主导潮流,也是行之有效的专业技术。本书在1987年版的基础上,补充了井身结构设计优化,并补充修改了最优化钻井的基本概念。同时,本书用Excel软件实现过去难以完成的运算过程,为油气田生产使用该技术创造了快捷、简便的手段。为了减轻读者们的负担,本书特提供一个光盘,将各种最优化的方法,做成Excel程序与该书一起发放给读者。

本书适用于从事油田钻井工作的工程技术人员,也可以供相关专业大专院校师生及研究生使用、参考。

图书在版编目(CIP)数据

最优化钻井理论基础与计算/郭学增编著.—2版.

北京:石油工业出版社,2016.1

ISBN 978-7-5183-0852-1

I. 最…

II. 郭…

III. ①表处理软件—应用—钻井理论

IV. ①TE21-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第199159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) 64523548

图书营销中心:(010) 64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2016年1月第2版 2016年1月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:9

字数:221千字 印数:1—3000册

定价:70.00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

最优化钻井技术历经多年的实践，已经走向成熟，成为当今钻井的主导潮流，也是行之有效的专业技术。计算机技术的飞速发展，使最优化钻井技术如虎添翼，带来了钻井工作者充实的工程内涵。钻井施工之前，必定要进行设计和计算，而最优化的理念，已是贯穿始终的观念；钻井施工完成后，必定要进行施工总结，以最优化理念去处理已取得的数据，业已成为技术人员的良好习惯。

但是也要看到，由于最优化钻井的模式比较烦琐、复杂，导致一些基层单位的工作人员忽略了最优化钻井技术带给人们的安全和经济效果。因此，有必要将最优化钻井的模式，与现代化的计算机软件技术有机地集合起来，用最简便的方法实现过去难以完成的运算过程，并使计算表格化、直观且形象，这就是作者修订并再版本书的初衷。

当今 Excel 软件的应用，使计算直观、作图方便，作者感到很有必要把最优化钻井与 Excel 软件很好地结合。这样既发挥了 Excel 软件的优势，同时也克服了最优化钻井技术的复杂性。

作者此前参加了“六五”期间三委一部主持的科技攻关项目，在中原油田实践和验证了最优化钻井模式的可行性和正确性，并探索了求取国内油田相关系数的有效途径。随后带着实施最优化钻井的思路，组建了以研究生为主体的石油大学录井队，奔赴塔里木参加石油大会战十年，为采集钻井资料，处理最优化钻井模式所必需的参数积累了经验。这些工程实践和经验，使本书比第一版在内容上更加丰富，且由于使用了 Excel 软件，在技术水平上也提高了几乎一个数量级。

作者于 2005 年起接受中国石油勘探开发研究院研究生部的邀请，为该院研究生班主讲了“最优化钻井”学位课，进一步检查和验证了 Excel 软件与“最优化钻井”学位课的结合效果。长期的教学实践，进一步增加了作者的信心和决心，一定要修订好本书，使其成为一本实用教材。

为了减轻工程技术人员的工作负担，作者特提供一个光盘，将各种最优化的方法，做成 Excel 程序与该书一起发放给读者。只要是 WINDOWS XP 系统的计算机，配有 OFFICE 2007 系统，均可使用该光盘里的 Excel 程序。希望读者在使用过程中，进一步发现不足之处，以便提高该书的技术水平。

作 者

2014 年 10 月

Preface

Safe, efficient, high-quality drilling always has been the pursuit direction of drilling workers. It is also the dominant trend of drilling technology development today. After decades of drilling practice, optimization drilling has matured and become an effective professional technology. Drilling design, planning, construction, and drilling analysis is now under the guidance of drilling optimization. Using optimized drilling idea and method to solve daily practical drilling problems has already become good personal behavior for drilling technician.

Due to the complexity of drilling problems, the cumbersome of optimized drilling mode and its calculation process, the application of drilling optimization has been greatly restricted. Optimized drilling technology has lost its role in drilling site. Fortunately, with the rapid progress of computer technology, optimized drilling technology provides substantial engineering meaning for drilling engineers. In order to promote the effective drilling technology, it is necessary to combine drilling optimization calculation with modern computer software organically. Using simple and intuitive method to interpret difficult operational work, making the drilling optimization process is easy to master and apply the algorithm are the authors' original intention of reissues and reedited this book.

As a general tabulation tool for statistical analysis, Excel has been widely used in processing a variety of electronic form. It has been also used to perform the various complicated calculation in optimized drilling, and satisfactory results are obtained.

The author had participated in a three Commission one Ministry science and technology research in the Zhongyuan oil field. The feasibility of the optimization method and the correctness of the drilling model were verified in practice, and various effective ways for parameter determination of drilling model was explored in domestic oil drilling. With the implementation of optimized drilling method, the Logging Team of Petroleum University had been set up and rushed to the Tarim Petroleum campaign for ten years, a large number of drilling data was collected, the processing method of optimizing drilling parameters was deeply investigated. Due to the use of Excel software, the new edition of "Optimization drilling theory and calculation" has been greatly improved in the technical level in comparison with its first version.

In 2005, the author accepted the invitation of the Graduate School of Petroleum Exploration and Development Institute, "Optimization Drilling" degree course for the graduate students was lectured. Therefore, all the calculation process and optimal algorithm have been verified by the graduate students.

In order to ease the burden of readers, this book provides a CD-ROM in which contains a variety of Excel program of optimization algorithm. As long as the computer supported by the Windows operating system equipped with an Office system, all can use this Excel program. I hope the readers in the use of the process, to further identify problems, to make corrections, and constantly improve the technological content and the level of the book.

Author
October, 2014

目 录

第一章 最优化钻井的基本概念	(1)
第二章 钻进过程的基本规律	(6)
第一节 钻进速度模式	(6)
第二节 钻头磨损速度模式	(16)
第三章 钻进目标函数分析	(26)
第一节 目标函数的几种模式	(26)
第二节 目标函数的极值与约束条件	(29)
第三节 最优磨损量、最优钻压与最优转速	(36)
第四节 目标函数的等值面	(51)
第四章 钻进资料数据处理	(57)
第一节 钻速实验数据处理	(57)
第二节 钻头资料数据处理	(65)
第三节 钻时录井资料分析	(70)
第四节 钻时录井曲线的数据处理	(78)
第五章 参数优选的计算方法	(92)
第一节 参数优选的顺序与无极值参数的优选	(92)
第二节 单纯形法	(93)
第三节 经典最优化方法	(96)
第四节 拉格朗日乘子法	(99)
第五节 极限磨损面上寻优逻辑分析	(111)
第六章 井身结构设计优化	(114)
第一节 井身结构设计的前提条件	(114)
第二节 抵御施工风险的钻井安全指标体系	(116)
第三节 递推法确定最大可行裸露段	(118)
第四节 用 Excel 设计井身结构的实例	(123)
第五节 用 Excel 设计的井身结构图	(128)
附录 主要数学推导	(129)
参考文献	(138)

第一章 最优化钻井的基本概念

什么是最优化钻井？由字面上理解，最优化钻井就是钻井工程与应用数学中的规划理论的结合。但在进一步探讨中，我们会发现最优化钻井有着非常深切的内涵。

当今世界科学领域中，系统论可算是一门综合研究复杂事物的理论学科。钻井工程整体也可看成是一个复杂、完整的系统。这个系统有它的组成，有它的各个组成的特性和运行规律，并且受各种环境的制约和影响，从而表现出各种工程现象。

钻井工程是在一个特定的地质条件下，运用一系列工具和装备，凭借人们已经掌握的知识 and 技能，去完成由地面到地下的油气通道。这样的工程项目，必然要涉及三个方面：即地质环境、钻井工具与装备和人们的技术知识。这也就是平时人们常说的，钻井工程要处理好的大三角关系，即地质环境—钻井工具与装备—人们的技术知识，这大三角关系构成了钻井的三大要素（图 1-1）。

人们对这三者的认识程度不尽相同，但这往往是钻井工程能否成功或顺利的关键。由上面对钻井工程大三角关系的分析来看，认识的不够全面或不完全正确，往往就是导致钻井工程不成功的主要原因。所以我们要掌握住钻井工程的大三角关系，使钻井工程多一分把握，多一分安全因素。

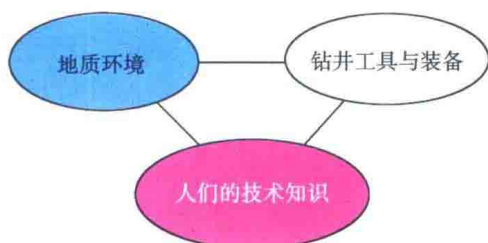


图 1-1 钻井工程的大三角关系

对比人们对这三个要素的认识，可以看出，对三者的认识程度是不同的。认识得最不清楚的，要算是地质环境。尽管有充分的地震资料、邻井的电测资料和取心资料，但那都不是本井的数据，它们对本工程仅有参考价值或借鉴价值。在认识中描述最清楚的，要算是钻井的工具与设备。处于中等认识水平的，要算是人们对自身能力的认识。其中不少是定性的，并非是定量的指标。就是在这样的认知情况下，人们在完成钻井的作业，在运行着钻井系统。

用系统论的观点，分析和认识钻井系统内部的关系和规律，是提高工程安全性和可靠性的关键，这也是学习和研究最优化钻井的初衷。

出于对钻井内部学科领域的划分，以便利用其相关的科学规律，我们将钻井系统工程细化为五个子系统，即：（1）地质环境子系统。（2）钻机特征子系统。（3）井眼子系统。（4）钻井液子系统。（5）钻柱子系统。

这五个子系统相互影响、相互制约，构成相当复杂的局面，这也就是将其视为钻井系统工程的重要原因。

研究钻井系统工程，就是要对其中每个子系统，而后对其组成的整个系统，进行系统描述、环境分析、系统优化、系统模拟仿真等项研究。

这些子系统，都有能反映自身特点的参数和各自的运行规律，并且以一定的方式与其他

子系统保持着联系。比如井眼子系统，其周围的环境就是地质子系统，可是井眼的内部又要充满具有一定参数的钻井液体系。

众所周知，钻井工程具有多个工程环节。它包括搬家安装、钻进、固井、完井、特殊作业等在时间上互相明显区分的工程环节。这使得这五个子系统轮番投入运作，形成了钻井过程的多样性与复杂性。

由钻井技术发展的时间背景来分析，最优化钻井是由喷射钻井、平衡钻井发展起来的钻井技术，它的核心内容是运用系统论的观点剖析钻井工程内部的运行规律，并将应用数学中的规划理论，运用于钻井的系统优化，以提高钻井这一耗资巨大而又风险性极强的工程的安全性和有效性。

实现钻井系统的最优化，必须有以实践资料为基础而建立起来的模式，必须有目标，否则就是一句空话。从实际数据中提取钻井的潜在规律和必要的特征参数，是钻井工作人员的基本功。另外，还需要在寻求简捷数据处理方法上下功夫。

钻井系统的优化包含两方面的内容：钻井的设计优化与钻井的施工优化。

钻井工程是一个不可完全预测的工程。钻井的工具设备、人员的技术知识和素质与地质环境描述这三者中，掌握最不清楚的、最不可完全预测的是地质环境。因此，钻井的施工过程，也是一个对地质环境的认识过程。每当钻遇一个新的地层，人们就需要根据新情况进行实时决策，决策后又需要用实践检验决策的正确性。这就是井场级的认识过程（图 1-2 中小椭圆部分）。

每当一项钻井工程结束后，将钻井进程中所取得的全部资料输入数据库，启动所有数据处理程序，从完钻井数据中提取地区的钻井规律：包括地质方面、钻井技术方面和工具装备不完善方面的信息。然后将这些新的信息补充到原有的地区规律当中去，以从事新一轮的钻井设计，提高钻井工作的安全性和有效性，然后再到现场去实施这个钻井设计。如此完成指挥部级的认识过程（图 1-2 中大椭圆部分）。

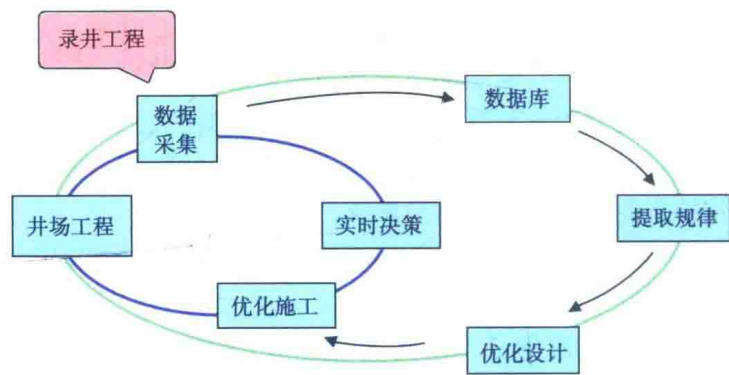


图 1-2 钻井系统最优化示意

一、钻井工程的学习曲线

深入到每个油田时，都可以看到随着完钻井数量的增加，该油田钻井成本不断下降的事实。这表征了钻井工程的学习曲线的存在，它反映了人们的自然认识过程。钻井工程的学习曲线的形状如图 1-3 所示。

$$C=C_0+C_1 \cdot e^{C_2(1-N)}$$

式中 C ——每口井的成本；
 C_0 ——本地区钻井的潜在成本；
 C_1 ——第一口井所交的学费；
 C_2 ——认识系数。

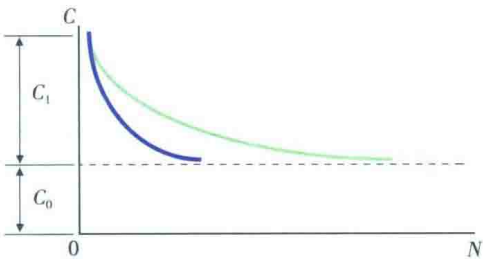


图 1-3 钻井工程的学习曲线

图中的纵坐标为全井的成本，横坐标是本地区油井完成的顺序号。从居于上面的绿色曲线可以看出全井的成本由第一口井的成本开始缓慢下降，并且逐步地接近该地区该井型的潜在成本 C_0 。由第一口井的成本到潜在成本之间的差值，或者说学习曲线下面所包罗的面积，就是本地区、本井型所付出的学费 C_1 。学习曲线中的系数 C_2 表征的是曲线下降的速度。当 N 为 1 时，钻井的成本是 C_1+C_0 。可以想象，如果学习曲线的下降速度更快一些，那么就可以节约成本，这就是钻井系统优化的结果（图中的蓝色曲线）。

二、钻井系统设计流程

钻井工程的设计流程如图 1-4 所示。图中的箭头表明了设计的步骤，它是多年来钻井经验积累的结果。

井身结构设计是全井最基础的设计，只有完成该设计才能进行其他的设计内容。井身结构的不合理，往往就是导致工程失败的根本原因，而且井身结构一旦付诸实施，中途无法改变和补救。因此，钻井系统设计优化的主要内容是井身结构设计优化。

井身结构设计优化的内容，将在本书第六章中详细叙述。

图 1-4 中的每一项设计，都会有其可以优化的内容。它们对于钻井工程的影响，可能会牵连到其他方面的设计优化，这也是由钻井工程的特点所决定的，比如套管柱设计可能会影响钻机选择等。总之，钻井的设计一环扣一环，需要全盘考虑其整体效果。

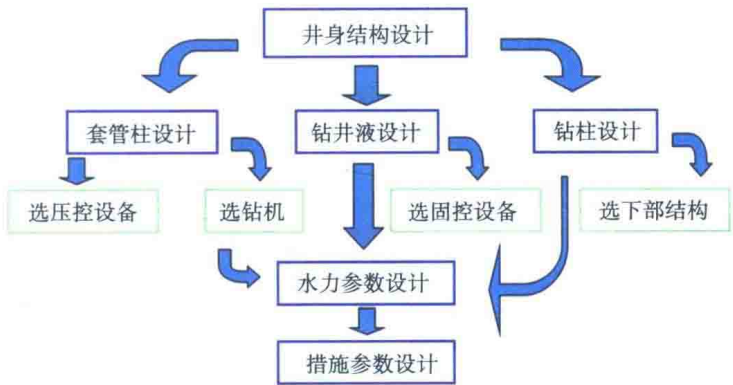


图 1-4 钻井系统设计内容和步骤

三、美国 Sperry-Sun 公司的 INSITE 系统

美国 Sperry-Sun 公司是一家从事随钻测量仪器的公司，于 1929 年成立，现在属于美国的 Halliburton 公司，并从事钻井工程服务工作。它所倡导的 INSITE 系统是实施钻井优化的

设施的一个范例（图 1-5）。

图 1-5 中的顶部是井场地下测量仪器与地面传感系统所形成的计算机局域网。该网络通过卫星天线将地下、地面的信息上传发送到互联网上。而基地的指挥部由互联网下载井场的实时数据，再分发给领导层与乙方合作者等，以此实现钻井的系统优化。

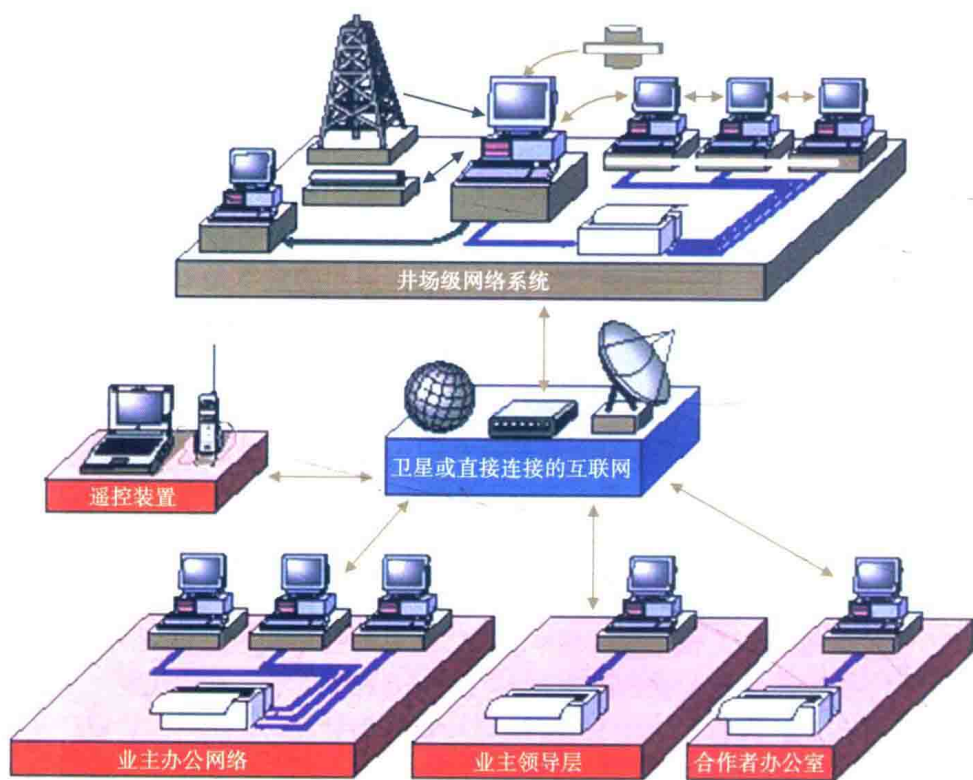


图 1-5 INSITE 系统

基地有了井场的数据之后，可动用基地和井场双重的技术资源，加速了数据处理的速度和深度，从而使钻井优化得以顺利实施（图 1-6）。

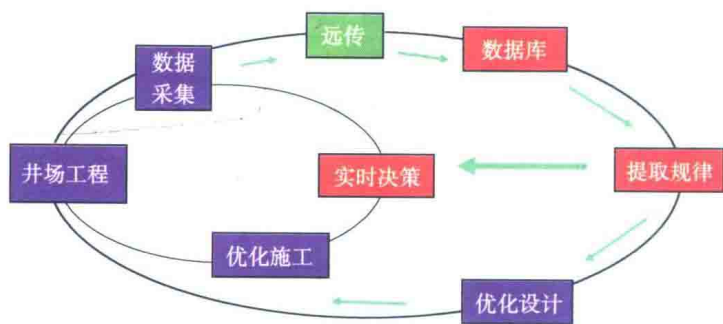


图 1-6 利用基地和井场资源加速钻井系统优化

四、钻井多 AGENT 协同工作系统

随着计算机技术及信息科学技术的发展，对于分散目标的控制和管理需要更加严格，且

需要更加科学化和人性化。钻井工程的现场是一个多学科、多部门汇集的场所，而且钻井工程又要求各个部门、各个方面均能达到符合专家的水平 and 要求的运作方式，因此，钻井的多 AGENT 协同工作系统也就应运而生（图 1-7）。

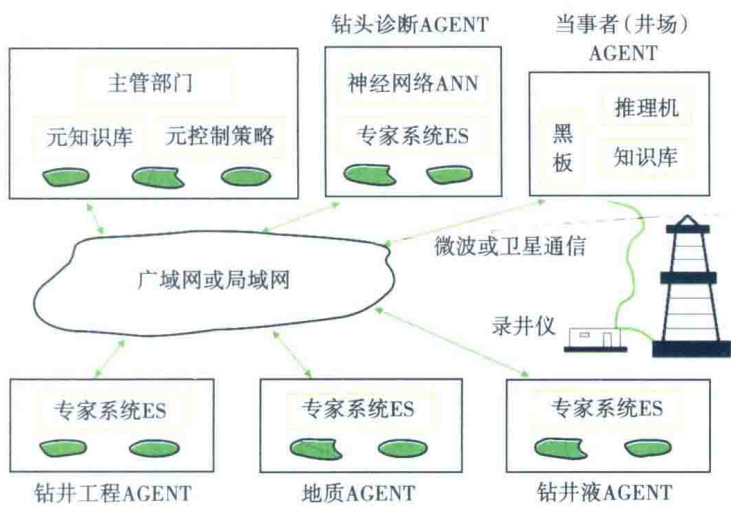


图 1-7 钻井多 AGENT 协同工作系统

该协同工作系统的特点是，井场作为协同系统一员参与其中。与其他系统的不同点在于它有局部的知识库、推理机和可以进行技术论证的黑板，使得当事者 AGENT 可以利用黑板达到相互沟通的目的。

第二章 钻进过程的基本规律

钻进过程是钻井工程的主要进程之一，是施工中的重要阶段。描述这一过程的数学模式，应充分反映钻进过程的基本规律，应揭示出钻进措施与钻进效果的关系，应尽可能排除工具和地层的影响。

钻进过程的数学模式受诸多因素影响：属于措施类型的因素有钻压、转速和水力参数，属于工具状况且不能被排除的因素有钻头的磨损状况；最后的因素是地层的属性。

钻进过程的模式，一直是钻井工作者所关心的问题。

(1) 1958 年 Moore P. L. 提出影响钻进速度的因素。

(2) 1960 年 Galle E. W. 与 Woods H. B. 创立了两元模式。

(3) 1969 年 Young F. S. 将两元模式成功应用于现场。

(4) 1974 年 Bourgoyne A. T. & Young F. S. 发表了多元模式。

(5) 1980 年后 Zaid Asward 及 D. W. C 等，又进一步完善了多元模式。

数学模式可以有千差万别，但它们所描述的基本规律，应该是一致的，它们所代表的趋势也应该大体是一致的。关键是掌握研究事物的方法，学会分析事物的实质。钻进过程的基本规律有两个：一个是地层被破碎，即地层破碎的规律，另一个不可忽视的方面是工具被磨损，即工具磨损的规律。

下面将介绍两个最成熟的模式。

第一节 钻进速度模式

用数学表达式描述钻进速度（简称“钻速”），是钻井走上科学化的起点和必要条件。影响钻速的因素非常多而且相当复杂，在这种情况下，应首先选择影响大的、规律性比较明显的作为钻速模式中的变量，而其他比较次要的则予以忽略。

一、钻压对钻进速度的影响

钻压是影响钻进速度（以下简称“钻速”）最直观、最明显的因素之一。过去国内外不少科技人员做过实验，得出各自不同的模式。对比这些模式可以看出，下面的两个条件是实验的必要条件：

(1) 井底的净化条件一定。

(2) 岩石破碎方式必须以机械破碎为主。

在这样的条件下，典型的钻压与钻速的关系曲线，如图 2-1 所示。

由图 2-1 可以看出，钻压与钻速在较大的范围内是近似于线性关系的。它们的关系可以用线性式描述。

$$R \propto (W-M) \quad (2-1)$$

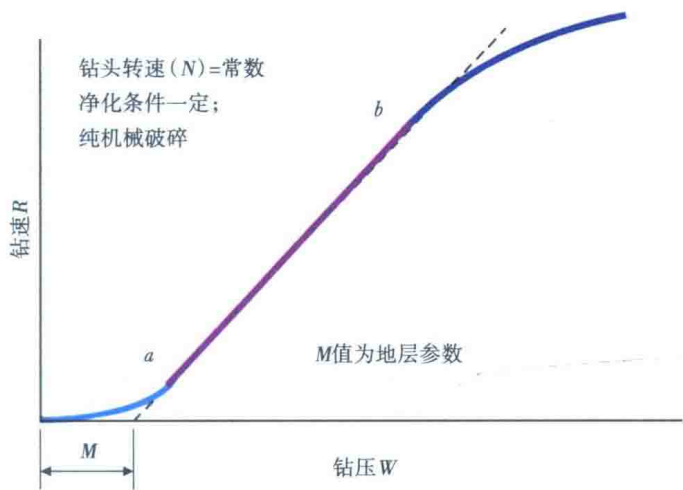


图 2-1 典型的钻压与钻速关系曲线

式中 R ——钻进速度，m/hr；
 W ——钻压，kN；
 M ——门限钻压，kN；

在此需要说明的钻压 W 和门限钻压 M 的单位问题。在式 (2-1) 中，钻压 W 的单位为千牛 (kN)， M 的单位当然也是千牛 (kN)。这是因为牛顿是国家标准确定的衡量力的大小的国际单位，钻压是属于力的范畴，故此处用的是千牛，用以表达钻速与钻压的函数关系。但现场的习惯用法是钻压的单位为吨 (t)，那公式中的门限钻压的单位也跟着是吨 (t)。因此特请读者注意钻速与钻压可以有两种表示方法，即用千牛表示或用吨表示。

门限钻压 M 取决于岩石的压实程度、应力状态和外界的作用条件。岩石的压实程度与应力状态是由埋藏深度、上覆岩层密度和岩石的矿物成分与结构所决定的，这些是决定门限钻压的内在因素。外界作用条件指的是除钻压、转速以外的作用条件，即水力参数的作用。

为了及时清除井底的岩屑，通常采用高能量的洗井液完成净化井底的功能。井底的岩石在钻压的作用下，常常会形成一些微裂缝。当水力能量足够大时，就可以使微裂缝扩大乃至使岩石破碎，故此时的水力参数的作用已不可忽视。在机械和水力联合作用下，钻速—钻压曲线会向左平移，门限钻压值 M 会逐渐减小甚至变成负值。这就是水力和机械联合破岩的效果。在浅地层中岩石压实程度差，胶结松散，可以用水力冲蚀造斜，就是水力破岩的实际例子。

在现有的水力功率条件下，接近地表的门限钻压值常为负值，随着埋藏深度的增加，门限钻压逐渐上升为正值，但上升幅度逐渐平缓，形成与压实规律相一致的变化趋势。门限钻压的具体数值是因油田而异的。表 2-1 列出了中原油田、任丘油田及美国墨西哥湾地区的门限钻压值。

从表 2-1 可以看出，门限钻压值具有强烈的地区性，不同地区的门限钻压值不可以互相引用。表 2-1 中列出的 M 值是以吨为单位的，这是为了便于与国外的数值对比，故使用了吨为单位。每个矿区必须依据本地区的实验资料回归出该地区的门限钻压值变化规律。门限钻压值还与使用的水力功率水平有关，随着钻井工艺水平的提高，会逐步采用更强的水力

功率，则门限钻压值也会逐步地发生变化，因此必须逐年加以修正。

表 2-1 门限钻压值与埋藏深度的关系

中原油田 ^①		任邱油田 ^②		美国墨西哥湾 ^③	
埋藏深度, m	M 值, t	埋藏深度, m	M 值, t	埋藏深度, m	M 值, t
明化镇 1270	-1.1913	明化镇 _上 1460	-0.1659	3000	-2.50
馆陶组 1520	+0.1372	明化镇 _下 1930	+0.6310		
东营组 2210	+2.2719	馆陶组 2180	+1.050		
沙一段 2580	+4.5018	东营组 3223	+1.600		
沙二段 3230	+6.3179	沙一段 _上 3615	+2.1394	3300	0.0
沙三段 3450	+7.7562	沙一段 _下 3800	+2.3830		
					+2.50

注：①据中原油田实验资料。
②据任丘油田实验资料。
③据美国 PTS 培训中心的资料。

由图 2-1 中，还应注意到，钻压超过 *b* 点，钻速与钻压的关系偏离了直线关系。这是因为净化条件已经限制了钻速增长的缘故。图 2-1 是在净化条件一定的情况下取得的。可以想象如果净化条件进一步改善，*a*、*b* 两点间的直线段可以进一步增长。

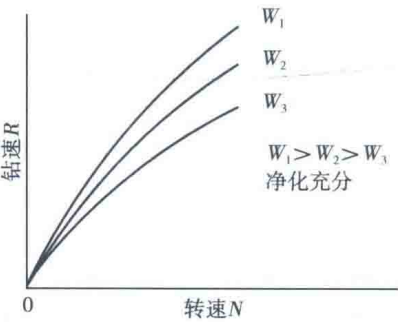


图 2-2 转速与钻速的关系

二、转速对钻进速度的影响

转速对钻速的影响关系，也是早期就得到研究的关系之一。随着钻头转速的提高，钻速是以指数函数的关系变化的，但指数一般都小于 1，这反映了岩石破碎时的时间效应。钻头转速提高后，钻头工作刃与岩石的接触时间缩短，故转速与钻速成指数关系，如图 2-2 所示。

钻速与钻头转速的关系式，可以写成式 (2-2)。

$$R \propto N^A \tag{2-2}$$

式中 *R*——钻速，m/h；
N——钻头转速，r/min；

λ ——转速指数，量纲为 1。

岩石破碎机理是从工具加载开始，发展到岩石内部应力达到破碎强度。这需要一定的时间。转速越快，工作刃与岩石的接触时间越短。当接触时间短到不能立即破碎时，岩石破碎就进入了疲劳破碎状态，需要多次接触才能破碎，影响了破碎效率。这也就是指数小于 1 的机理。转速指数 λ 只能通过实验和数据处理才能求得。

根据大量的现场实践，转速指数 λ 的量纲为 1，其值一般在 0.5~1.0 范围内变化。地表岩石的钻速指数接近于 1.0。岩石埋藏得越深， λ 值越下降，但下降的幅度逐步变小，形成与地层压实规律相似的趋势。

三、牙齿磨损对钻进速度的影响

随着钻头工作刃的磨损，钻头的工作效率将明显下降，钻进的速度也将随之降低。

首先要定义的是牙齿磨损量，用牙齿的相对磨损高度表达牙齿磨损量是比较合理的。通常用 H 表示牙齿磨损量，新钻头时，牙齿磨损量 $H=0$ ，牙齿全部磨损时 $H=1$ 。

若钻压与钻速保持恒定，则钻速与牙齿磨损量之间的关系如图 2-3 所示。

钻速随牙齿磨损量增大而下降的规律，可以用式 (2-3) 表达。

$$R \propto \frac{1}{1 + C_2 H} \quad (2-3)$$

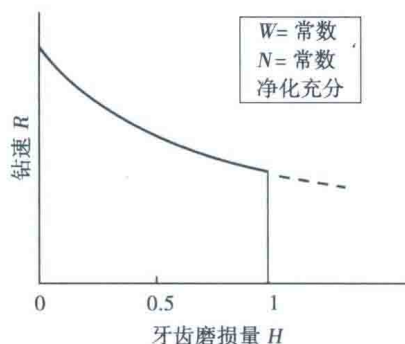


图 2-3 钻速与牙齿磨损量的关系

式中 H ——牙齿磨损量，量纲为 1；

C_2 ——牙齿磨损因数，量纲为 1；

牙齿磨损因数 (Tooth Wear Factor)，有时称之为钝化因数 (Dulling Factor)，它是钻头齿形结构与岩石性质之间的中间参数。因此，它的数值只能由现场数据经处理后得到，在一般情况下， C_2 的数值小于 4.0，大于 0.5，对于金刚石钻头，则可以认为 C_2 近于零。

牙齿磨损因数 C_2 的物理意义可以描述为牙齿磨损到 1 时，钻速的下降倍数。若 $C_2=1$ ，则牙齿全部磨损时，钻速比初始钻速下降了一半，即钻速是初始钻速的 1/2。

对于镶齿钻头，牙齿磨损量 H 具有另外的基准。 $H=1$ 时并不意味着是把露出的牙齿全部磨损，而是对应于一定的磨损高度，钻头磨损到这一高度时，钻速变为初始钻速的 1/2，换句话说，镶齿钻头的牙齿磨损因数恒等于 2。

四、地层可钻性对钻进速度的影响

同样的钻压和转速，使用相同类型的钻头，在不同的地层中钻进，可以获得完全不同的钻速。这说明了地层可以影响钻进速度的高低。这个影响可以用地层的可钻性系数 K 来描述。它的涵义是当钻压、转速、牙齿磨损量、水力参数和压差参数等这些影响钻速的因素均恒定时，钻进速度与可钻性系数 K 成正比。

根据前面的三个影响因素，钻速的关系式可以写成式 (2-4)：

$$R \propto (W - M) \cdot N^A \cdot \frac{1}{1 + C_2 H}$$

(2-4)

若在式 (2-4) 中引入尚未确定单位的钻速系数 K_0 ，则钻速的关系式可以写成等式格式，见式 (2-5)。

$$R = K_0 \cdot (W - M) \cdot N^A \cdot \frac{1}{1 + C_2 H}$$

(2-5)

式 (2-5) 便是 1969 年 Young 发表论文时的钻速模式，又称之为杨氏钻速方程。当时 K_0 值被定义为可钻性系数。实际上 K_0 为三个影响因素归 1 时（即钻压增值为 1、转速为 1r/min 和牙齿磨损量为零时）的钻速值。在这样的定义下，系数 K_0 自然地包括了水力参数、钻井液参数和压差的影响。

在修正的杨氏钻速方程中，水力参数和压差影响，已作为一个独立的因素加以考虑。它们已由钻速系数中分离出来，故修正的杨氏钻速方程钻速系数为 K ，它只包含了岩石可钻性和钻井液性能影响以及其他一些未考虑的因素，这在建模的进程中是一个可喜的进步。

本书中仍把包含钻井液性能影响的系数 K 值，称为可钻性系数。这个问题只有待创建新的、全面描述钻井液性能的模式以后，才能彻底解决。

可钻性系数 K 的数值，一般在 0.001 到 0.2 范围内变化。 K 的具体数值只有通过现场资料的处理后才能取得。表 2-2 列出了中原油田五个层段的平均地层可钻性系数。

表 2-2 中原油田各层的平均可钻性系数

层段	东营组	沙一段	沙二上	沙二下	沙三段
K 值	5.253×10^{-2}	4.319×10^{-3}	4.473×10^{-2}	4.040×10^{-2}	3.858×10^{-2}

因为 K 值所表达的是在一定条件下的钻速，所以它的量纲是：m/h/t/r/min。其物理意义则是：在现有的钻井液性能和水力参数条件下，每一吨钻压增量在每分钟一转的转速条件下，一个新钻头在该地层所能取得的，以米每小时为单位的钻速。以这样的一个特征参数来描述地层的抗钻属性，因此称其为可钻性系数。

五、水力参数对钻进速度的影响

水力参数对钻速的影响可以分为两个方面。一是水力清岩，即利用水力能量及时清除已经剥离井底的岩屑，这就是水力净化的作用；二是水力破岩，即利用较大的水力能量使具有裂缝或胶结不完善的岩石破碎，这就相当于水力切割的作用。实质上水力参数的两种作用同时存在，下面分别加以叙述。

1. 水力净化的影响

为了由杨氏钻速方程的系数 K_0 中分离出水力净化的影响，需要引用 1975 年阿姆科研究中心 (AMOCO) 发表的钻速与水力参数关系曲线，如图 2-4 所示。

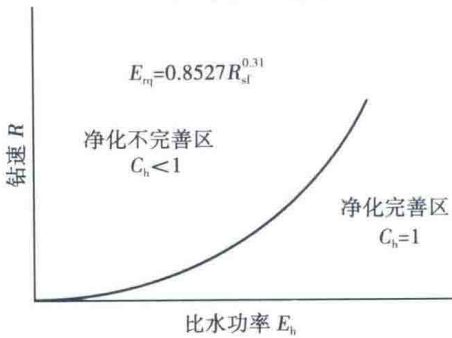


图 2-4 钻速与水力参数关系曲线

由图 2-4 中可以看出，一定的钻进速度意味着单位时间内钻出的岩屑总量，而该数量的岩屑需要一定的水功率才能将其完全清除。低于该水功率值，井底的净化就不完善，则实际钻速就会比净化完善时的钻速低。

实际钻速与净化完善时的钻速比即为水力净化系数的含义，用符号 C_h 表示。通过大量的实验数据，确定它与水功率的关系为式 (2-6)。

$$C_h = \frac{R}{R_{sf}} = \frac{E_h}{E_{rq}} \tag{2-6}$$

式中 R ——实际钻速，m/h；
 R_{sf} ——净化完善时的钻速，m/h；
 E_h ——实际的比水功率，hp/in²^①；
 E_{rq} ——净化完善时的比水功率，hp/in²。

根据图 2-4 的净化完善区与不完善区的分界曲线，可回归成式 (2-7) 的模式。

$$E_{rq} = 0.8527R_{sf}^{0.31} \tag{2-7}$$

C_h 系数不可以大于 1，如果 $E_h > E_{rq}$ 时，取 $C_h = 1$ ，即 $R = R_{sf}$ 。系数 C_h 只描述了水力清岩的作用，因此，只能用它说明井底的净化程度。现举例以说明这些数值间的关系。

[例 2-1] 有一只 9 $\frac{7}{8}$ in 钻头，在净化充分的条件下，可以获得 80m/h 的钻速。但当时提供的水力功率仅为 153hp。求该条件下的水力净化系数 C_h 。

解：水力净化系数 C_h 是当时钻速与净化充分时的钻速之比，等于当时的井底的水力功率与净化充分时的井底水力功率之比。故以井底水力功率之比求之。

$$C_h = \frac{153/0.7854 \times 9.875^2}{0.8527 \times 80^{0.31}} = \frac{2}{3.317} = 0.603$$

此时实际钻进速度仅为净化充分时钻进速度的 60.3%。

如果提供的水力功率达到 254hp，即比水马力为 3.317hp/in²，则系数 $C_h = 1$ 。

水力净化系数 C_h ，考虑的是水力清岩的作用。水力破岩的作用效果，在门限钻压 M 值的变化中体现出来。

2. 水力破岩的影响

根据中原油田大量钻头数据，经过计算机的处理，取得了如下重要的统计规律，如图 2-5 所示。

由图 2-5 可以看出，随着比水功率的提高，钻进速度是成直线关系上升的，且愈接近地表，钻进速度的增长愈大。这也说明了水力机械联合破岩的作用在该井段的效果比较明显。但在较深的井段中（中原油田 2800m 以下），则起主要作用的是机械破碎，而水力破岩则居于次要的地位。

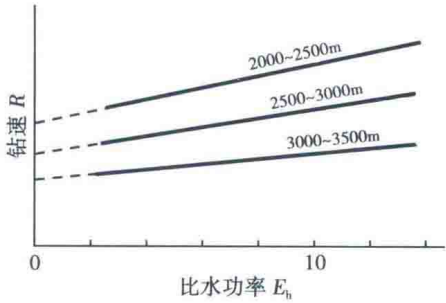


图 2-5 比水功率与钻速的统计规律

① 为了照顾工程习惯，本书部分地方使用了非法定计量单位，请读者在阅读时注意。