

石油钻井设备计算与设计

[苏 A·J·伊里基基]

石油工业出版社

目 录

第一章 钻机的设计基础	(1)
第一节 引言	(1)
一、井身结构和建井条件	(1)
二、钻井过程、钻机的结构与功能	(3)
三、 <u>钻机类型</u> 和基本参数的选择	(10)
第二节 钻井设备的设计原则	(16)
一、钻井设备的设计任务和技术基础	(16)
二、钻井设备设计的经济基础	(17)
三、钻井设备的可靠性和寿命	(23)
四、加速完善钻井设备和降低成本的方法	(39)
第三节 钻井设备的设计方法	(45)
一、初步设计	(45)
二、钻井设备的配置方案和方法	(51)
三、钻机传动系统的拟定方法	(64)
四、钻井设备元件的计算原理	(75)

五、计算和设计钻井设备时采用 数字电子计算机(ЭЦВМ)	(87)
第二章 钻机动力和传动装置的设计	(94)
第一节 动力驱动特性的选择	(94)
一、驱动类型及其特性的确定	(94)
二、动力驱动中发动机的选择	(98)
三、驱动装置人工适应性手段的选择	(108)
四、发动机并联工作	(123)
第二节 动力驱动装置的设计	(126)
一、发动机的选择	(126)
二、动力和传动装置的配置	(135)
第三章 起下钻设备的设计	(148)
第一节 起下钻设备的组成和功能	(148)
一、起下钻过程、设备的功能	(148)
二、拟定传动系统图	(151)
三、作用在起下钻设备元件上的负荷的确定	(159)
四、起下钻设备功率的确定	(169)
五、起下钻时间	(171)

六、起升档数及其比例的选择	(175)
第二节 游动系统的设计	(177)
一、功能、结构、类型和要求	(177)
二、游动系统钢丝绳的选择	(181)
✓三、天车和游车	(194)
✓四、钻机大钩和组合式游车大钩	(203)
五、游动系统计算的说明	(212)
第三节 钻井绞车的设计	(219)
✓一、功能、结构、技术特性和要求	(219)
二、钻井绞车运动和结构方案的制定	(223)
三、钻井绞车底座和滚筒的设计与计算	(229)
四、刹车机构的设计与计算	(236)
参考文献	(253)

第一章 钻机设计基础

第一节 引言

一、井身结构和建井条件

钻机是一套复杂的机器。它由一些钻不同结构的井时(即井深 L 与井径 D_c 之比值很大的矿场开发井 ($L/D_c \approx 1000 \sim 3000$)), 严格地完成一定功能的机器、机组和机构组成。井身结构是指井的各区段的直径和深度、下入套管柱的壁厚和长度、钻不同井段时用的钻头直径、供注水泥浆的管外空间、井斜角或允许的垂直偏差等给定数值的集合。根据钻井的目的、地质条件、深度、钻井技术、油层开发方案和其它因素, 井身结构完全可能是各式各样的。

钻井是为了勘察地下的矿物、确定岩石的性质和生产层的特性等(勘探井), 或者是为了从地下开采石油、天然气或水(生产井)。

生产石油和天然气的井, 一般钻成垂直的或倾斜的, 深度为 $1000 \sim 4000$ 米。美国已钻成的最深井的深度为 9450 米。目前, 苏联正在钻深达 10000 米的井。

单个井段的直径 D_c 和其数量取决于钻井目的、井身结构、井深和建井的经济性。钻油气井时, 生产井的最终直径一般为 $0.14 \sim 0.22$ 米, 深度为 $1000 \sim 7000$ 米, 套管 $2 \sim 5$ 层。

钻井要在不同的气候和地理条件下进行。在极北方边远地区要在永冻带中钻井。还要在温和及炎热气候下, 在沙漠

里、在无水地区钻井；或反之在水洼地区、河流、湖泊或海上钻井。

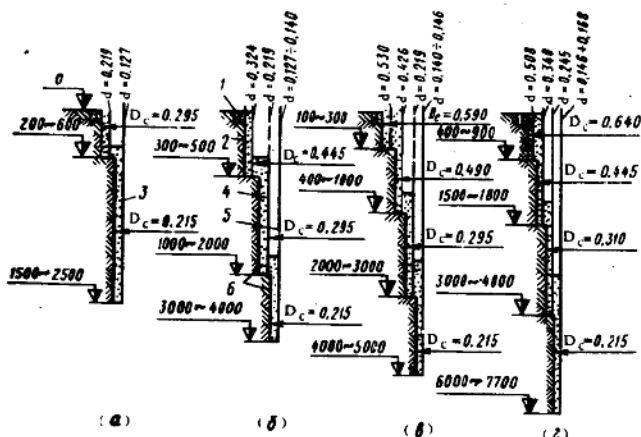


图1 油气井井身结构示意图 (单位, 米)

(a) 一两层套管的井；(b) 一带尾管 ($d=219$ 毫米) 的三层套管的井；(c) 一带尾管 ($d=219$ 毫米) 的四层套管的井；(d) 一四层套管的深井；1—导管；2—表层套管；3—技术套管；4—技术套管—尾管；5—生产套管 (D_c —井筒直径； d —套管直径)

井的间距可能是从几米 (多底井、丛式井等) 到几十米 (生产井)，而有时可达几百公里 (基准井)。

井一般由长 6~12 米的导管、长 50~200 米或更长的表层套管、一段或几段中间套管柱和油层套管组成。如果利用表层套管作技术套管来封隔上部不稳定的岩层，则其下入深度可达 600~800 米。在深 3000~3500 米的井身结构简单的井中，当无复杂地层时，下入表层套管后只下入生产套管。

在复杂的地质条件下钻井时，为避免事故还要下入中间套管（也叫技术套管），下入深度取决于地质条件，从上一层套管或表层套管的套管鞋处伸出长度一般不超过 2000 米。

下入表层套管或技术套管后要进行固井，即把水泥浆注满井壁和套管之间的一部分环形空间或下入套管柱的全部高度。

钻不同井段的钻头尺寸，按照将要进行固井的管径 d 来选择。

图 1 所示为典型的井身结构。

建井的全部周期由下列步骤组成：选择井位和准备井场；安装钻机的各种设备；设备试运转；钻井（钻井过程，即钻进和为更换磨损的钻头而起下钻）；下套管和固井；消除复杂情况和事故；地球物理测井和试油；拆卸设备并将其运移到新井位。目前正常情况下这一周期的时间为：井深 20~25 米时——不到一天；1500~2000 米——几天；3000~5000 米——几个月；7000~8000 米——达几年。

各式各样的钻井条件和井身结构决定了钻成指定井的整套钻井设备的参数和性能，以及结构、运移性、可靠性、工作时间和使用的方便程度。

二、钻井过程、钻机的结构与功能

钻井方法有很多种，但其中只有少数在工业上得到广泛应用。按照破碎岩石的特点，钻井方法分为机械方法、加热方法和电腐蚀方法等。

目前应用的主要是机械方法。这种钻井方法按照岩石破碎工具的特点分为冲击式、旋转式和旋击式。所钻下的岩屑用钻井液、空气或借助机械设备（螺旋输送机、岩石捞筒、提篮等）从井中排出去。

冲击钻井主要用于钻硬地层的浅井。

钻深油气井只能用旋转式钻井方法，所用的岩石破碎工具是钻头。钻头具有不同的型式和结构。钻头固定在钻柱的下端，从钻柱里面泵送钻井液或空气流，将岩屑经钻柱和井壁之间的环形空间带出。

钻头或是由地上动力机带动旋转（转盘钻井），或是由直接接在钻头上方的井底动力机（水力或电力的）带动旋转。

由安装在地面上的钻机来完成钻井的全过程。

旋转钻井过程由一系列按严格的顺序、重复的工序组成：把钻柱下入井里；钻头在井底工作（破碎岩石的过程，循环液体、旋转和送进钻头）；随着井筒的加深而接长钻柱；起下钻柱更换被磨损的钻头；辅助或处理事故作业（洗井、净化和配制泥浆、处理复杂情况和事故等）^(8, 9)。

为了完成必要的全部任务，进行上述作业时要采用下列设备：钻杆柱、钻机、密封井口设备。

钻杆柱由方钻杆主动管和长 6、9 或 12 米的单根钻井管子组成（俗称钻杆）。每根钻杆的端部有接头，接头上有锥形丝扣，以保证快速连接和拆卸钻杆柱。为了给钻头加上必须的钻压，钻杆的下部加有钻铤（加重的管子）。此外，还有扩孔器、扶正器、钻头。有时还应用井底马达。

钻杆柱的直径、质量、长度和强度决定了钻机的基本参数——最大许用钩载、钻井深度和动力机功率。

钻浅层勘探井的钻柱，采用直径为 60~89 毫米的钻杆；钻深的勘探井和油气生产井，采用直径为 102、114、127 和 140 毫米的钻杆。按照井身结构、深度、钻井工艺和泵的排量来选择钻杆柱的结构。

一定尺寸的钻杆能钻的井深取决于钻杆材料的性能。钻机由下列设备组成：悬吊钻柱重量、送钻、下钻、起钻和接长单根的机构；保证钻井液在井中循环、将泥浆中的钻屑清除出去和恢复泥浆性能的整套设备；以及旋转钻柱的设备等一整套设备和机组。

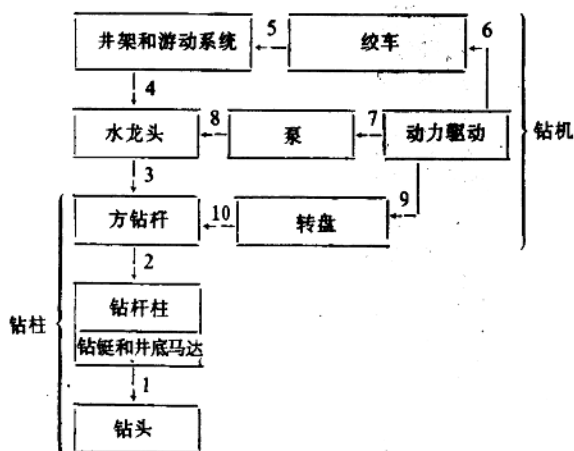


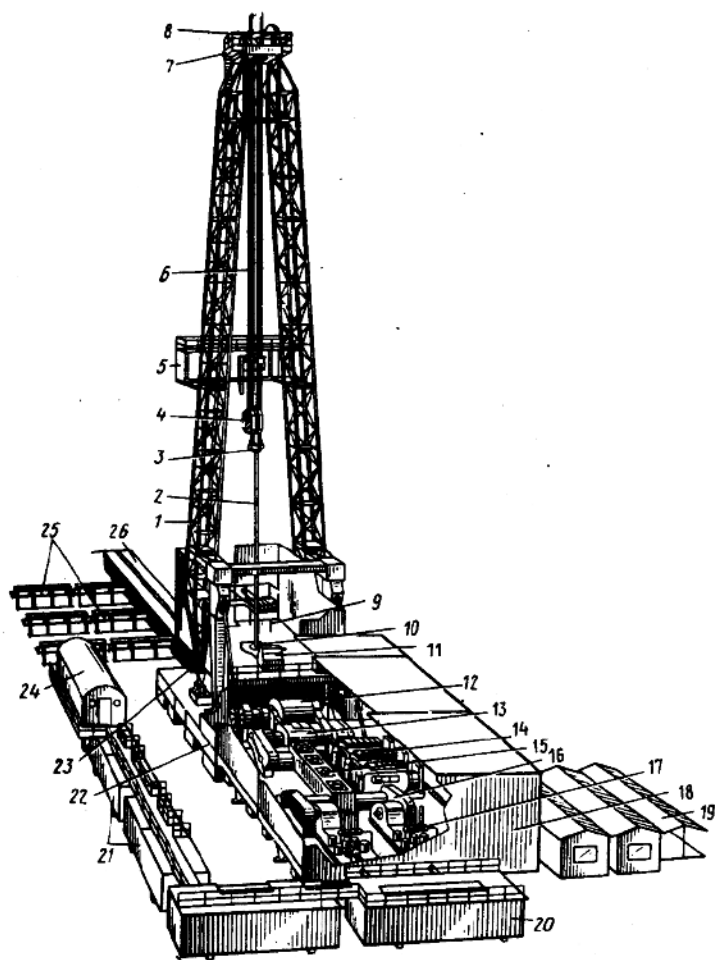
图2 钻机功能示意图

1—导径接头和扶正器；2、3—水龙头和方钻杆的保护接头；4—大钩；5—钢丝绳快绳；6、7、9—绞车、泵和转盘的传动装置；8—高压管线；10—转盘方补心

封闭井口的设备由盲板（全封）和通孔（半封）闸板防喷器、万能防喷器及其控制系统组成。

不管旋转钻井的方法如何，为了完成全部工序，在所有情况下钻机的基本方案和组成钻机的设备都基本相同，不同的仅是它们的参数和结构。

图2所示，为用洗井液（钻井液）进行旋转钻井的深井



钻机功能示意图，图3是钻机的外形图。

钻机由承受钻柱重量的井架，动力驱动装置，钻头旋转和送进设备，泵送钻井液的泵组，泥浆配置、净化和恢复泥浆性能的设备，更换钻头时起下钻用的设备，封闭井口设备，检测仪表及其它的装置组成。钻机中还包括安装设备的底座，钻台桥，装燃料、液体和水的各种容器。

当所应用设备的性能全面地满足钻井工艺要求时，才能获得最大的有效钻井速度。岩石的物理机械性能——可钻性的变化范围很大，因此钻机应能够在足够宽的范围内调节钻井参数。确定钻井参数的因素包括：与钻井条件相对应的钻头类型和尺寸、作用在钻头上的轴向负荷、钻头转速、泵送的液体或气体的质量和数量、钻头在井底的工作时间。

钻头在井底工作的时间取决于钻头的类型和结构、加工质量及所钻地层的性质和钻头的使用条件。钻头在井底的工作寿命：牙轮钻头在硬地层用涡轮钻井为1.5~3小时，钻软地层为80~250小时；刮刀钻头和研磨型钻头用涡轮钻井为10~30小时，用转盘钻井为30~60小时；金刚石钻头在硬地层为10~20小时，在中硬和软地层可达200小时。在上述时间内应保证钻机的全部机械装置和机组能正常工作。

图3 陆上深井钻机

1—A型井架；2—钻柱；3—吊卡；4—游动滑车；5—二层台；6—钢丝绳；7—天车平台；8—天车；9—立根盒；10—转盘；11—辅助绞车；12—主绞车；13—变速箱；14—动力机；15、16—井车箱；17—钻井泵；18—机房；19—生活间；20、21—泥浆吸入池和中间池；22、23—机房和转盘底座；24—泥浆净化设备；25—钻杆架；26—钻台桥

制，一般裸眼井为 1~2 米 / 秒，在下有套管的井段可达 3 米 / 秒。

为了防止卡住新钻头，当钻头接近井底时要减慢钻柱的下放速度，因为上一个被磨损的钻头改变了井的直径和形状。在离井底一定距离时停住钻头，冲洗井底后再开始转动钻头，小心地将钻头放到井底，以小载荷扩眼，使井底形成新钻头的形状。然后，很快但平稳地给钻头加载，在尽可能短的时间内调到最大载荷。然后根据所钻地层的性能调整载荷。钻井速度可以在 0.1~60 米 / 小时或更大范围内变化。

当钻进到方钻杆的全长之后，停止钻进。预提一下钻柱并循环泥浆，使钻下的岩屑在环形空间里上升到一定的高度，并使岩屑在接单根的时间内不致于落到井底。为了平衡管外环形空间和钻柱内泥浆的密度，同样也必须循环泥浆。

洗井后将钻柱上提方钻杆的长度，并将其坐放到转盘上的卡瓦或吊卡上，把方钻杆同水龙头一起从钻柱上卸下，放入井口附近的鼠洞。然后往钻柱上接一根事先准备好的钻杆。钻杆接长之后稍提一下离开转盘，把接长的单根放入井中，重新把钻柱放到转盘上，接上方钻杆。循环泥浆后将钻柱放到井底继续钻进。

在每一行程中接单根的次数取决于钻头的进尺和所接钻杆的长度，而钻进时间取决于钻井速度和钻头进尺。钻头进尺与钻头的结构和制造质量、所钻岩石的类型、钻井工艺参数、井深、所钻岩石的物理机械性质和钻井液的性能及钻井队的技术状况等因素有关。但是，一般情况下随着井深的增加，钻头的工作指标下降。钻头被磨损后，起升钻具更换钻头。起钻时钻柱运动的速度取决于起升系统的功率，其平均速度为 1 米 / 秒左右，而且根据钻柱的重量和长度在 0.4~

0.8 米/秒范围内变化。

三、钻机类型和基本参数的选择

1. 影响钻机选择的因素

尽管在各种情况下钻机所完成的功能差不多一样，用一个等级和型式的钻机在陆地、水上和其它条件下钻各种不同深度的勘探井、生产井、直井或定向井是不可能的。同时，对不同的钻井条件也不可能都制造一种专门的钻机，所以钻机应具有一定的通用性，或者应能够很快修改以适应具体的钻井条件。

为此，按照下列因素选择钻机的类型是设计钻机的首要任务。

钻机用途和钻井条件——在陆地（平原、山地林区）、沼泽地、海上钻井等；气候、环境温度及其变化、风力等。

钻井目地——钻勘探井还是钻生产井。

井的形式和参数——垂直井或定向井；钻井深度和井身结构。

钻井方法和工艺（转盘或井底马达）；井底需要的水功率；钻井液类型和性质（液体、泡沫或气体），基本液体的特性（水或石油）；起下钻的方法等。

钻井的地质条件（所钻岩石的特性，可能遇到的复杂情况，压力的突变性，温度按井深的变化，地下水浸蚀的程度等）。

搞清楚和分析了所有这些因素后，确定所设计钻机的类型。不同类型钻机的设计方法基本相同，我们研究称之为系列钻机的设计方法，在陆地用于中间地带平原地区钻井，这类钻机是目前数量最大的钻机。

2. 钻机参数的选择

钻机应保证具有最高的生产率和最大的效率。钻机唯一的产品是井或每米进尺，而钻机生产率和效率的尺度是井的成本或给定条件下每米进尺的费用。

显然，用深井钻机可以钻 1000 米的井（例如用钻 6000~7000 米的深井钻机），这事先就可以说是不经济的；而用钻井深 1000 米的钻机来钻 6000~7000 米的深井自然是不可能的。多数情况下，不对钻机的参数作相应的分析（特性和使用数据），从理论上找到使用这种或那种钻机的经济合理范围是很困难的。

钻机的特性包括钻井深度、泵的排量和压力、钻机的迁移性及驱动钻机所采用的能源类型。

钻机可以分成两大类：用于钻深的生产井和勘探井的钻机及用于钻浅的构造井和勘测井的钻机。

这两类钻机的基本特性列于表 1。

表 1 不同用途的钻机的基本特性

参 数	钻机的参数值	
	钻生产井和深的 勘探井的钻机	钻构造井和勘 测井的钻机
钻井深度，米	2000~10000	25~3000
驱动功率，千瓦	440~3000	15~400
大钩最大许用负荷，兆牛顿	1.2~5.0	0.01~0.5
钻井直径，米	0.14~0.9	0.076~0.17
钻杆直径，毫米	89~140	43~89

第一类钻机不同于第二类钻机，它钻的井深，井眼直径大，用的钻杆也较重。自然，第一类钻机的功率和最大许用载荷明显大得多，重量也大。

第一类钻机（见图3）机动性较小，一般搬迁时，根据道路和运输工具的状况把它分成单机（分块），从一个井场运到新井场。第二类钻机机动性大，一般全部设备安装在一辆汽车、拖拉机的底盘上，或安装在拖车的底盘上。

每一类钻机又分为几级，它们分别能在一定井深和井身结构条件下保证最高钻井效率。

当拟定新钻机结构或对现有钻机进行改造时，产生了这样一个问题，即在一定条件下每一级钻机应具有什么样的特性和参数最有效。

既然每种钻机在动力机功率一定、大钩的最大许用载荷一定时，根据采用钻杆和套管的直径和重量，可以钻不同井深和井身结构的井，那么，可用（用直径114毫米，每米重30公斤的钻柱钻直径为215毫米的井）所能钻的井深（米）来比较深井钻机的功率和等级。当使用其它直径和重量的钻杆柱时，该钻机的极限可钻井深就会与其额定的可钻井深有明显的区别。

苏联的ГОСТ16293-70和OCT26-02-807-73中规定了钻生产井和勘探井的8个钻机等级（图5，表2）。按国标ГОСТ1575-75，钻机的最大许用钩载取相对应的系列，兆牛顿（吨力）：0.5（50）；0.63（63）；0.8（80）；1.0（100）；1.25（125）；1.4（140）；1.6（160）；1.8（180）；2.0（200）；2.25（255）；2.8（280）；3.2（320）；3.6（360）；4.0（400）；4.5（450）；5.0（500）；5.5（550）；6.3（630）；7.1（710）；8.0（800）；9.0（900）；10（1000）。设计新等级钻机时，应从给出的系列中选取起升机组的最大许用载荷。

钻机单个机组的参数及其变化范围的选择，将在相应的

章节里讨论。

表2 钻生产井和深的勘探井不同等级钻机的基本参数

参 数	钻机的参数值							
钻柱重量为 30 米 / 公斤								
时假定的钻井深度, 米	2000	2500	3000	4000	5000	6500	8000	10000
最大许用钩载, 兆牛顿	1.2	1.4	1.7	2.0	2.5	3.2	4.0	5.0
绞车滚筒功率, 千瓦	440	550	660	880	1100	1600	2200	3000
钻井泵最大泵压, 兆帕	25	25	32	32	32	32	40	40
转盘通孔直径, 米	0.46	0.56	0.56	0.56	0.56	0.70	0.76	0.95

立根长度和塔式井架或桅架的高度, 同样是钻机非常重要的特性。对于深井钻机, 采用两根或三根长 9~13.5 米的钻杆组成的 27 米长的立根, 或由两根长 12 米的钻杆或者三根长 8 米的钻杆组成的不到 25 米长的立根。对于第二类钻机, 采用长 12 和 18 米的立根。随着立根长度的增加, 钻柱中的立根数减少, 同时上扣和卸扣的次数、将钻杆往立根盒指梁里移进移出的次数也都减少了。

增加立根长度可以缩短一些机动起升的时间, 因为消耗在钻柱加速和停止的时间是不变的, 而能以高速起下的那部分钻柱增长了。但是选择立根长度时还应考虑, 当不改变钻杆材料只增加其长度时, 其重量也必然增大。这会使起下钻