

钻井井架、底座的设计计算

常玉连 刘玉泉 编著

石油工业出版社

序 言

石油矿场钢结构设计技术近十几年来在国内发展十分迅速，计算机分析在设计各个领域得到了广泛的应用。井架、底座作为钻机钢结构的重要组成部分，其设计计算引起一些科研单位、制造厂家及高等学校的重视，研究、应用新的结构设计方法及计算分析技术进行井架、底座设计和计算，使我国石油钻机钢结构设计水平有了长足的进步。

作者本身自1982年开始专门从事井架、底座设计计算方面的研究工作。先后参加完成“3200钻机前开口井架试验研究及理论分析”，“自升式钻机底座”等项科研课题，研究成果分别获中国石油天然气总公司科技进步二等奖和三等奖。

本书的主要目的是将作者近年来的研究成果及国内外的最新研究成果系统化。从结构设计原理出发，重点介绍结构、构件的设计计算方法，使本书成为设计师的计算手册，将新的计算方法推广到工程实际设计之中。

本书可分为三个部分：设计计算基础、构件计算、结构整体计算。第二章至第四章主要讨论设计计算规定，荷载计算、连接计算；第五章和第六章分别讨论两类主要构件梁、柱的设计计算；第七章、第八章则分别讨论井架与底座的整体分析计算。各章配有相应的工程实际的计算例题，具体说明计算方法。

本书指出了发表的主要资料来源，未公开发表的大庆石油学院井架课题组、石油天然气总公司施工技术研究所井架课题组的井架、底座研究报告，宝鸡石油机械厂的一些技术报告也为本书提供了丰富的资料，增加了本书的实用性。

本书的写作得到了石油大学陈如恒教授、张嗣伟教授的热情支持。并承蒙大庆石油学院杨敏嘉教授主审，提出了许多具体的修改意见；李振纲副教授审阅了第三章原稿，在此深表谢意。

作 者

一九九二年九月

目 录

第一章 石油钻机井架、底座概论	(1)
第一节 井架的结构类型	(1)
一、塔形井架	(1)
二、前开口形井架	(1)
三、A形井架	(1)
四、桅形井架	(2)
第二节 钻机底座的结构类型	(5)
一、层箱式底座 (Box on box)	(5)
二、箱块式底座 (Raised floor substructure)	(5)
三、自升式钻机底座 (Self elevating substructure)	(7)
第二章 井架、底座的计算原理	(8)
第一节 设计计算的基本规定	(8)
一、静强度规定	(8)
二、不稳定性规定	(8)
三、疲劳强度规定	(10)
四、动力反应的规定	(10)
五、脆性断裂的规定	(11)
六、塑性规定	(11)
七、小结	(11)
第二节 设计算法	(12)
一、设计算法概述	(12)
二、近似概率算法	(12)
三、井架及底座的设计计算公式	(18)
四、井架及底座的失效概率	(20)
五、优化设计算法	(22)
六、疲劳强度算法	(23)
第三章 井架、底座的荷载	(30)
第一节 荷载的确定与计算	(30)
一、恒定荷载	(30)
二、工作荷载	(31)
三、自然荷载	(37)
四、安装荷载	(47)
五、整体拖运与运输荷载	(56)
六、动态井架的动力荷载	(57)
第二节 荷载的组合原则与计算方法	(58)
一、计算目的与荷载工况	(58)
二、荷载组合的模式法	(60)
第四章 结构与构件的连接计算	(62)
第一节 概述	(62)

一、井架及底座连接的方法	(62)
二、构件连接的力学性质	(62)
第二节 焊接连接的计算	(63)
一、焊接连接的形式与焊缝构造	(63)
二、对接焊缝中的应力	(65)
三、角焊缝中的应力	(66)
四、角钢构件的角焊缝	(70)
五、焊缝群的几何性质	(73)
第三节 销座耳板连接的计算	(76)
一、销座耳板连接的结构形式	(76)
二、耳板与座板中的应力分析	(76)
三、销轴、耳板和座板的计算	(78)
第四节 螺栓连接的计算	(80)
一、单个螺栓的计算	(80)
二、螺栓群的计算	(81)
第五章 井架与底座中梁类构件计算	(89)
第一节 梁类构件的结构类型及计算模型	(89)
第二节 梁中内力及支座反力的计算	(89)
一、各类梁中内力及支座反力计算图表	(89)
二、弹性地基梁中内力及反力的计算	(90)
第三节 梁的截面估算	(104)
一、型钢梁的截面估算	(104)
二、组合梁的截面估算	(104)
第四节 梁中的应力及强度计算	(106)
一、单向弯曲梁中的应力	(106)
二、双向弯曲梁中的应力	(107)
三、非对称弯曲梁中的应力	(108)
四、梁中的局部压应力和折算应力	(110)
五、规范及梁的强度条件判定	(111)
第五节 梁的整体稳定计算	(113)
一、梁的整体稳定计算原理	(113)
二、规范中的计算公式及整体稳定系数	(114)
第六节 梁腹板的局部稳定计算	(118)
第六章 井架与底座中柱类构件计算	(129)
第一节 柱类构件的结构类型及计算模型	(129)
一、柱类构件的结构类型	(129)
二、柱类构件的计算模型	(129)
第二节 轴心受力柱的计算	(130)
一、轴心受力柱的强度、刚度计算	(133)
二、轴心受压柱的稳定计算	(132)
第三节 压弯柱的计算	(140)
一、压弯柱的强度计算	(140)
二、压弯柱的稳定计算	(141)
第四节 柱的计算长度	(150)

一、结构中实腹柱的计算长度	(150)
二、变截面格构柱的整体计算长度	(150)
第七章 井架的计算	(155)
第一节 井架的基本参数	(155)
一、最大钩载	(155)
二、井架的高度	(155)
三、二层台容量	(156)
四、井架的最大抗风能力	(156)
五、其它参数	(156)
第二节 井架的计算模型	(157)
一、井架计算模型的概述	(157)
二、塔形井架的计算模型	(158)
三、前开口形井架的计算模型	(161)
四、A形井架的计算模型	(162)
五、桅形井架的计算模型	(163)
六、计算工况对计算模型的影响	(164)
七、有限单元法计算井架整体稳定的计算模型	(165)
第三节 井架整体的静力计算	(165)
一、有限元法的基本概念	(165)
二、桁架结构的有限元分析原理	(168)
三、刚架结构有限元计算简述	(177)
四、计算程序与计算框图	(182)
五、井架静力计算实例	(186)
第四节 井架的疲劳计算	(263)
一、井架疲劳强度分析的计算步骤	(203)
二、井架疲劳强度计算实例	(203)
第五节 井架的整体稳定计算	(205)
一、井架整体稳定计算的理论折算法	(205)
二、井架整体稳定计算的有限元法	(206)
三、井架整体稳定计算实例	(207)
第八章 钻机底座的计算	(211)
第一节 底座的基本参数	(211)
一、钻台高度	(211)
二、转盘梁最大静载荷	(214)
三、立根盒最大静载荷	(214)
四、立根盒容量	(214)
第二节 底座的计算模型	(214)
一、空间刚架——土弹簧模型	(214)
二、空间梁、柱、板和土弹簧混合模型	(216)
第三节 底座的整体静力计算	(218)
一、整拖ZJ-15D钻机底座结构分析	(218)
二、ZJ-32J钻机箱块式钻机底座的结构分析	(226)
附表	(237)
参考文献	(251)

第一章 石油钻机井架、底座概论

井架、底座是石油钻机的重要组成部分。井架用于安放天车、游车、大钩等起升设备与工具，承受起下钻、下套管及其它作业产生的荷载，提供起下钻及存放管柱操作的高度与空间，是一种塔桅式钢结构物。底座包括钻台底座、机房底座和钻井泵底座，用来支承钻井设备，提供工人操作平台和安装井口装置的空间，提供各工作设备间的安装定位保证，它承受钻井工作荷载及设备的自重荷载，并传递分配给基础和地基。随着不同地貌条件和地质条件下的油气田的勘探开发，按照不同的钻井工艺要求，设计制造出各种不同功能的钻机，因而也出现各种不同结构类型的井架与底座。

第一节 井架的结构类型

一、塔形井架

塔形井架是最古老的一种井架结构形式。塔形井架是横截面为正方形或矩形的空间结构，整个结构由许多实腹式杆件组成，杆件与杆件间用螺栓连接。若采用分段焊接，则采用销耳座板连接。塔形井架的结构组成如图1-1所示。

塔形井架由于多为单杆组装结构，安装拆卸所费时间多，且为高空作业，陆地中深井及深井钻机已趋向淘汰此种类型井架，但由于它具有很宽的底部基础支持和很大的组合截面惯性矩，因此其整体稳定性最好。这一特点使塔形井架成为陆地超深井钻机井架和海洋钻机井架的最主要的一种结构形式。

二、前开口形井架

第一部前开口形井架是在1939年由Lee. C. Moore公司制造的。前开口井架是横截面为矩形，前面敞开（或大部分敞开），由若干段焊接结构用螺栓或销子连接组装成整体的空间结构。前开口井架的结构如图1-2所示。

前开口井架的结构组成一般包括天车台、二层台，3~5段的主体结构、立管平台，工作梯，起升人字架。整个井架在地面或接近地面处组装，依靠绞车的动力，通过起升人字架将井架整体起升到工作位置。

此外，前开口井架也可做成二段伸缩式，下段在钻台上起升后，再用钢绳或其它方法将上段拉出。

三、A形井架

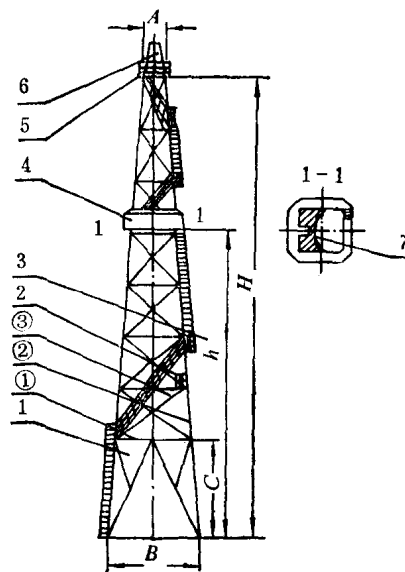


图 1-1 塔形井架的结构组成

1—主体结构；2—天车台；3—井架顶起重架；4—二层台；5—立管平台；6—工作梯；7—指梁

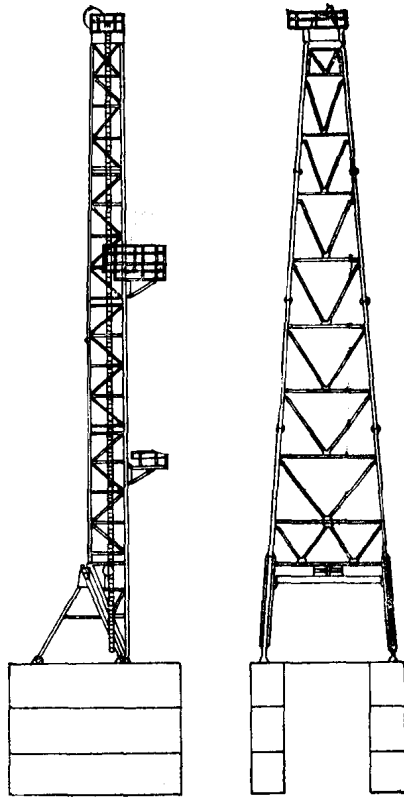


图 1—2 前开口形井架

A形井架是美国 Ideco 公司在1948年研究设计出的一种特殊类型井架。它由两个格构式或管柱式大腿，靠天车台与井架上部的附加杆件和二层台连接成“A”字形的空间结构，见图1—3。A形井架与前开口形井架一样，在地面或接近地面处组装，用起升人字架或撑杆将其整体起升到工作位置。

A形井架的结构组成除井架主体结构由两条大腿代替外，其余与塔形井架，前开口形井架相同。A形井架的主要特点是：井架前后敞开，司钻可以全部看清游车大钩升降和工人在二层台的操作情况，所以A形井架被称为“全部可以看得清井架”(Full view mast)。钻台上井架只有两组焊大腿的支脚，钻台面宽敞。多数组焊大腿采用矩形截面，腹杆采用单斜布置，如图1—3所示，大腿稳定性好。一般井架及起升人字架在高仅为1.2米至1.5米的基座上安装起升，井架可直接从运输拖车上起升，从而节省了安装运输时间和费用。

我国八十年代以前设计的井架多为A形井架。

四、桅形井架

桅形井架主要作为车装钻机井架和修井机井架。桅形井架是由一段或几段格构式柱或管柱式大腿组成的空间结构。它在工作时多向井口方向倾斜，一般为 $3^{\circ}\sim 8^{\circ}$ ，需要用绷绳来保持结构的稳定性。图1—4为一车装钻机桅形井架示意图。

桅形井架可分为伸缩式和不伸缩式。车装钻机和修井机井架多为伸缩式。由于载运车辆条件限制，整个井架的横截面尺寸不能太大。为了避免因井架内部空间狭小而造成游动系统上下运行不便，并适应井架伸缩的需要，往往将井架的前扇做成部分或全部敞开的结构，同时使井架向井口方向倾斜，以保证游动的系统上下行方便。因此，绷绳是桅形井架不可缺少的基本支承。

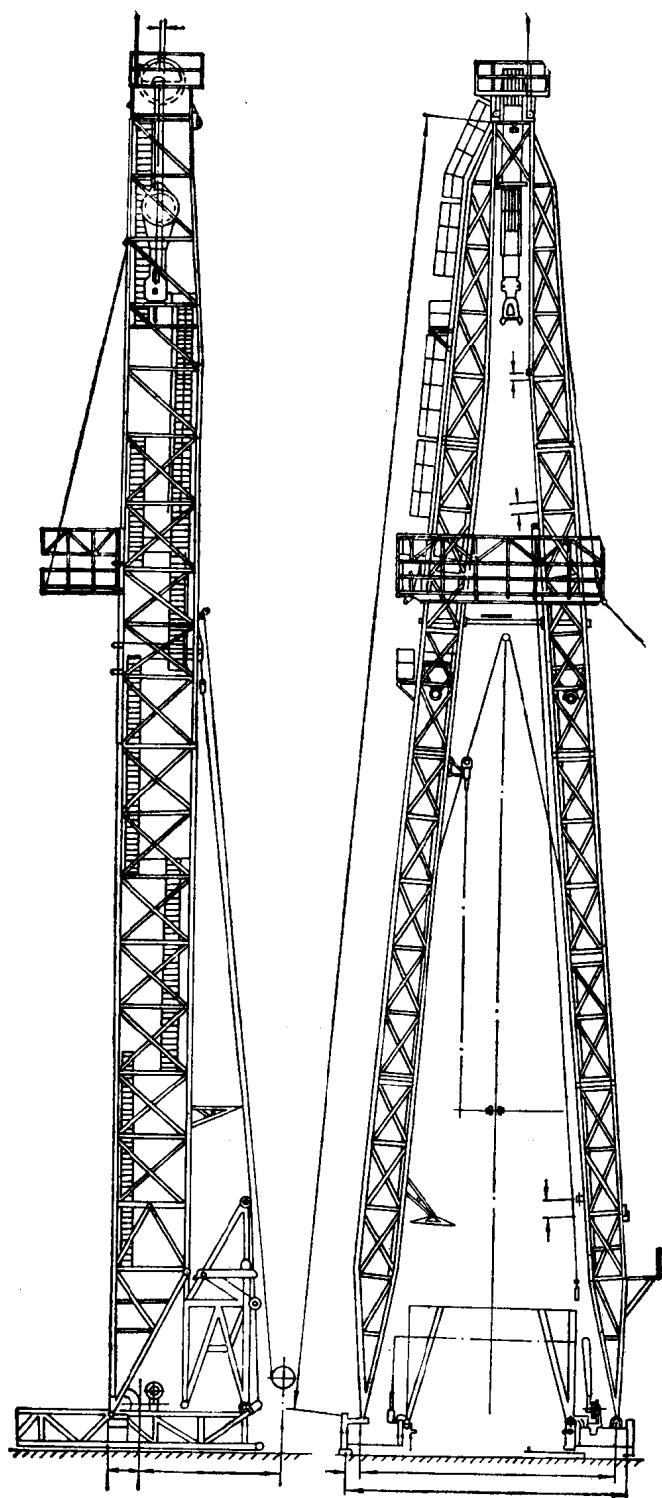


图 1—3 M41—320 A 形井架

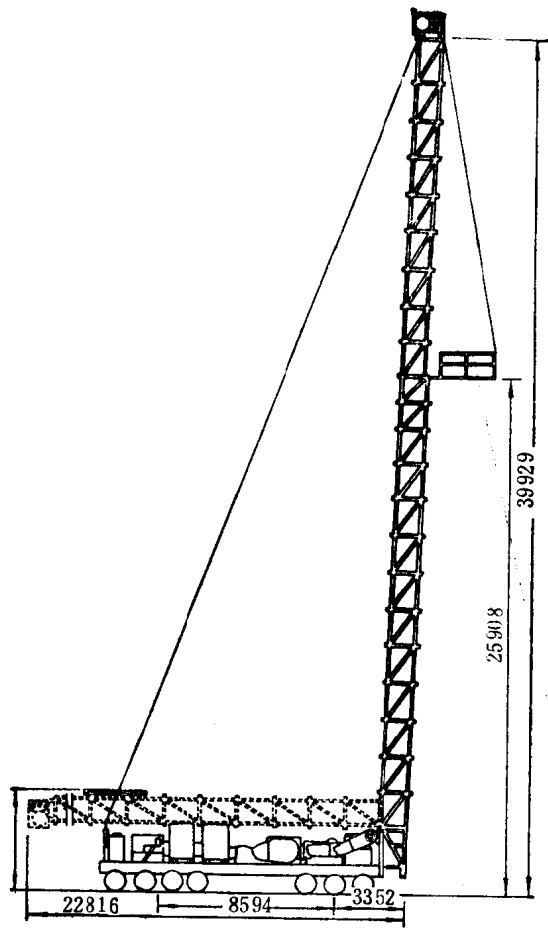


图 1—4 车装钻机桅形井架

车装桅形井架通过一个井架基架与地面的基座相连，连接的方式可分为铰接和固定式两种，图1—5给出三种结构的井架基架与基座的连接结构。

除上边四种基本类型井架外，尚有一些特殊类型的井架如斜井钻机井架、丛式井钻机井架等。

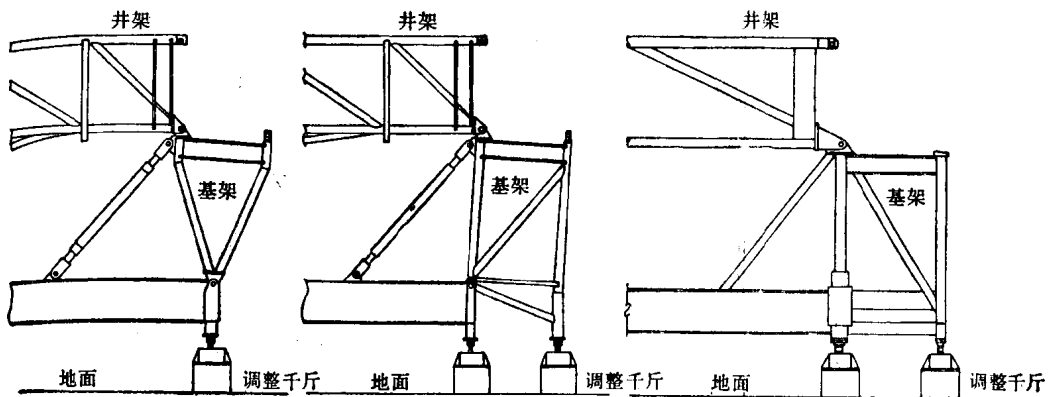


图 1—5 桅形井架与基架的连接

第二节 钻机底座的结构类型

随着钻井工艺和钻机结构的不断发展，出现了多种不同结构类型的底座，但归结起来，钻机底座主要可以分为三大类型。

一、层箱式底座 (Box on box)

层箱式底座是在普通的箱式底座基础上发展起来的，其主要特征是以箱形框架作为基本构件，用一些杆件连接而成。所谓层箱式底座，即箱形框架叠累而成的结构，故又称箱叠式底座。根据钻台高度要求，有双层箱式如图1—6、三层箱式底座，个别还有四层箱式，钻台高度可达4~10m，或更高。

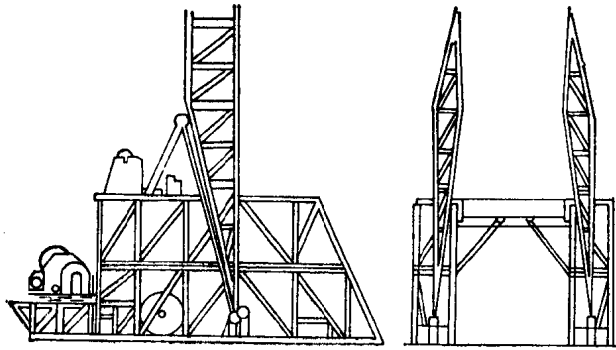


图 1—6 双层箱式底座

层箱式底座的特点是：设计和制造工艺简单，但结构总重量大，钻机拆迁安装工作量大，高空作业需要大型起重设备。针对上述特点，出现了井架低位起升的层箱式底座如图1—6。井架与主绞车安放在低矮的基座上，起升井架时，绞车及动力机等既是工作机又是平衡配重。

目前，尽管层箱式底座仍广泛使用，但它有被淘汰的趋势。国外80年代新设计的钻机底座只有极少数的特殊钻机底座采用层箱结构。例如 Dual Arctic 钻机公司建造的北极钻机43号，其底座采用层箱式结构，整个底座安装在海尔曼—滚动装置(Hilman—roller)上，当钻机在同一基础上从某一井位到另一井位(well to well)的移动时，牵动海尔曼滚动装置，仅需一个半小时，即可完成钻机整体搬迁。

二、箱块式底座 (Raised floor substructure)

箱块式底座的主要特征是：根据底座各部分的不同功用，分别设计成不同的箱形框架、组合梁及板块，用销轴连接组装成整体。立根盒梁与绞车支架之间通过转盘梁用销轴连接起来，组成钻台。井架支撑于两个侧箱之上，以适应井架低位整体起升的要求。为克服重型绞车上高钻台的困难，绞车一般采用主绞车、猫头绞车分离方案，主绞车放在机房底座上，猫头绞车在钻台上，因此钻台与机房底座有较大的高度差。

图1—7是美国60年代中后期设计的箱块式底座，装备在 Nick—loS 钻井公司28号钻机上，该钻机是柴油机一直流电动机驱动钻机。从图中可看出这种底座是在层箱式基础上发展起来的，主要是解决主绞车上钻台难的问题。

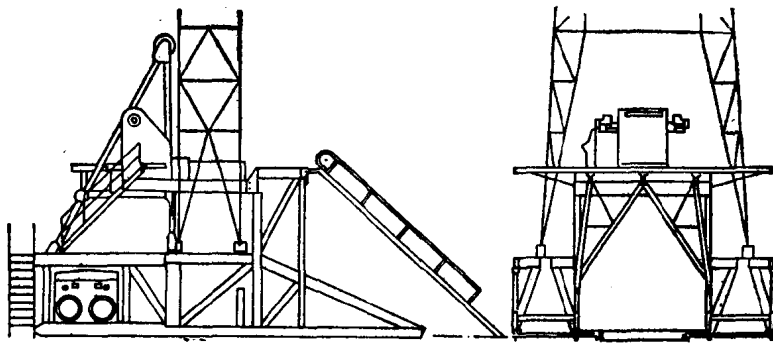
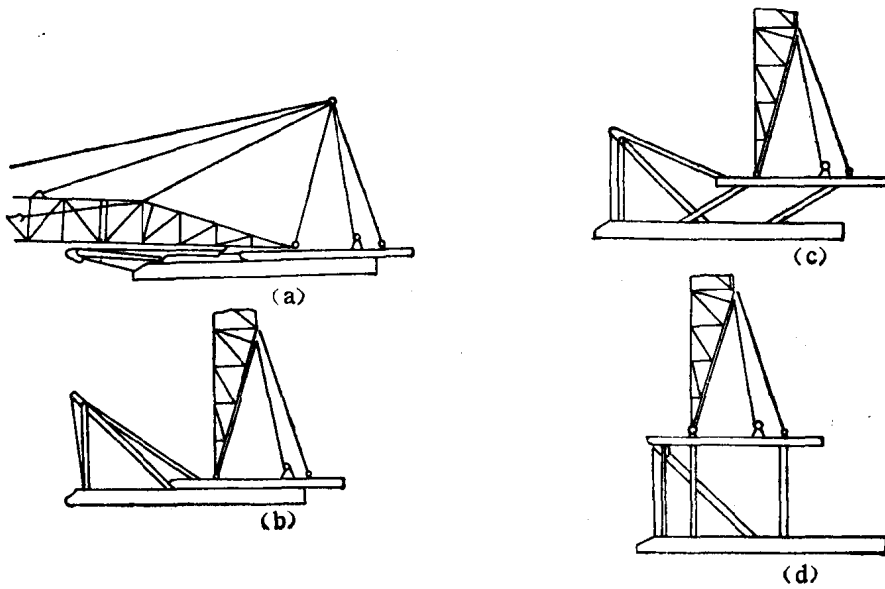
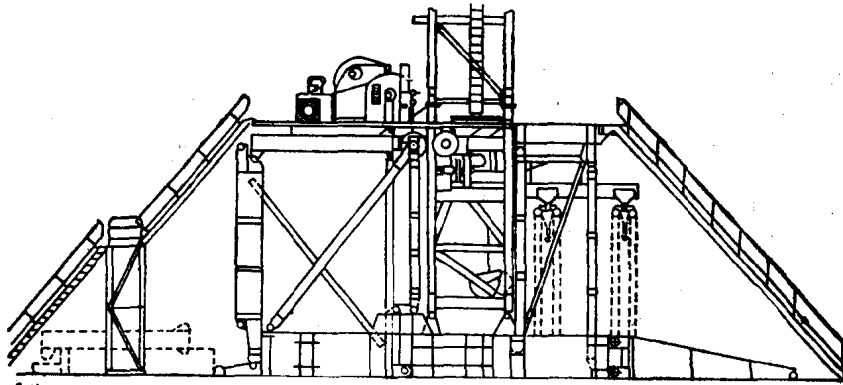


图 1-7 美国箱块式钻机底座

箱块式底座由于整体分块，所以拆迁、安装和运输都方便。但为保证井架的有效高度（钻台面至天车梁底面间的距离），必然增加井架的名义高度（井架支腿中心至天车梁底面间的距离）。箱块式底座钻台面高一般为4~7m。从钻台布置、安装程序看，这种底座适用作柴油机驱动，采用主、辅绞车分离方案的钻机底座。



1-8 弹弓式底座起升过程示意图

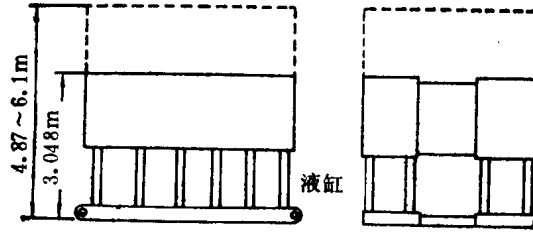


1-9 美国 Ideco 公司旋升式底座

三、自升式钻机底座 (Self elevating substructure)

自升式钻机底座是近些年来发展起来的一类钻机底座，其主要特征是：底座在地面组装，组装时的钻台面高度一般为卡车车身高度（约1.5m），同时将绞车、转盘、井架等在底座上安装固定，然后通过底座自身配备的动力传动系统或钻井绞车的动力，将底座整体起升到钻台工作高度。

自升式底座和结构类型很多，按起升方式可分为三种主要类型：弹弓式底座（如图1—8）、旋升式底座（如图1—9）。伸缩式底座（如图1—10）。



1—10 伸缩液缸式底座结构示意图

第二章 井架、底座的计算原理

第一节 设计计算的基本规定

钻机井架、底座是一种特殊的钢结构物，主要承受在钻井过程中及其它工艺过程中产生的荷载，同时兼有提供设备运转空间和工人操作平台等项职能。井架、底座设计计算的目的是保证其在规定的使用寿命期间能安全可靠地支承设计荷载。大多数的钻机荷载受钻井工艺复杂性的影响，具有一定程度的不确定性。井架、底座的设计荷载的主要参数可按标准或规范确定，但其具体设计时仍要考虑具体工作环境，如陆地、海上，以及实际钻井工艺发展的影响。若井架、底座的使用情况发生变化，则可能导致结构使用的不经济、不安全或发生破坏。破坏可按使用可靠性或强度分类。使用可靠性的破坏与控制正常使用的相关规定有关，主要根据不可接受的变形、位移、振动等其它物理指标来控制。强度破坏是与断裂、失稳倒塌及不能接受的非弹性变形有关。结构发生不同类型的破坏取决于荷载和结构类型情况，同时也与控制设计的计算规定有关。在大多数情况下，计算规定主要依据预期结构所发生的破坏类型而定。对井架及底座结构通常有各种不同类型的破坏，如杆件或构件的局部破坏、整体结构的破坏等。因而在设计计算中不但需要分别考虑不同的计算规定，而且还要针对不同的使用要求，在设计计算中同时应用不同的计算规定。

下面讨论井架及底座设计计算中的各种计算规定。

一、静强度规定

井架及底座的静强度规定是这样：结构中任何部位的应力如果达到材料标定的屈服强度 f_y ，就必须认为结构已经破坏。

这个规定认为结构中某一部位的应力达到屈服强度，是结构承载的临界状态。按照虎克定律，为保证结构在弹性范围内工作，用概率统计分析方法，对结构材料抗力性能进行统计分析，在一定的可靠度情况下，确定出一个实际应用的材料强度许用值，称为设计强度 f 。设计强度低于材料的比例极限，当结构的计算应力低于设计强度时，结构就始终处于弹性范围内工作。因此，井架及底座工作的静强度条件为

$$\sigma \leq f \quad (2-1)$$

式中 σ ——构件或结构中的计算应力；

f ——材料的设计强度。

二、不稳定性规定

井架及底座都是杆系结构，一些主要工作构件是柱，井架本身也可折算成一个以承受压力荷载为主的柱。在这些柱的工作过程中，可能发生单个柱的失稳破坏，也可能发生结构整体的失稳破坏。柱的失稳或称压杆稳定问题，是指柱或柱类构件在压力荷载增加到某一数值时达到的一种状态。此时，若载荷继续增加，其承载能力将因变形的继续增加而降低，以至破坏，完全丧失承载能力。图2-1(a)表示一中心受压柱。当压力 P 数值不大时，若有侧向力使柱发生轻微弯曲，离开直线形状，当侧向力撤出之后，柱经过摆动，仍

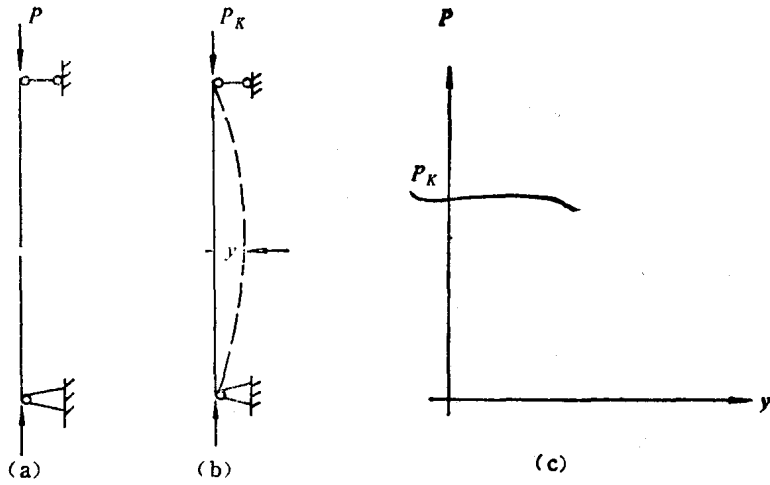


图 2-1 中心受压柱的失稳过程

然回到原来的直线形状。继续增大压力 P ，当达到某一数值 P_K 时，如图 2-1 (b) 所示，柱仍保持为直线形状，若有任何微小的侧向力使柱发生轻微弯曲，但当侧向力撤出之后，弯曲变形仍保持不变，不再恢复到原来的直线形状，此时称为柱的稳定临界状态。当 P 超过 P_K 时，柱的弯曲变形迅速增加直至柱的破坏。图 2-1 (c) 的压力—挠度曲线形式描述了柱的失稳过程。

偏心受压柱的受力状态如图 2-2 (a) 所示，作用荷载 P 的偏心距为 e ，其失稳过程的

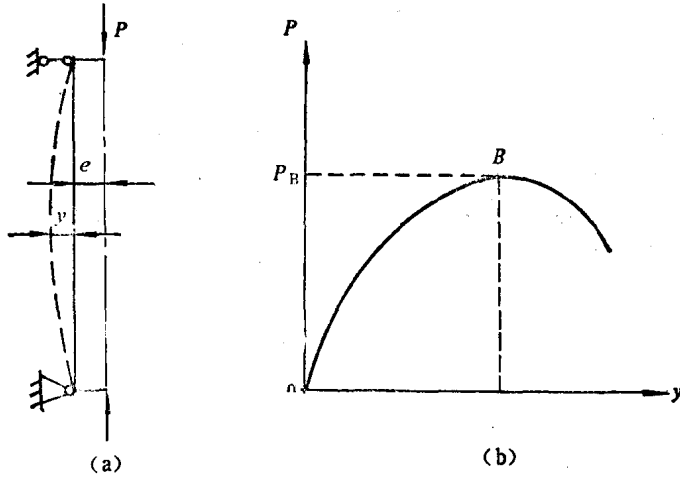


图 2-2 偏心受压柱

压力—挠度曲线如图 2-2 (b) 所示。当荷载 P 逐渐增大，柱的挠度也随着逐渐增大。当压力 P 增大到 P_B 时，若再想增加压力 P ，则由于柱的挠度迅速增大而难以实现。 P_B 表示偏心受压柱的最大承载能力，亦称为偏心受压柱的临界荷载 P_B 。

无论是中心受压柱还是偏心受压柱，在井架及底座结构中是大量存在的，有时往往是它们控制整个结构的设计。因此稳定性规定为

$$\sigma_w \leq f_w \quad (2-2)$$

式中 σ_w ——稳定计算应力；

f_w ——稳定计算设计强度。

在实际计算中，当杆件的长细比超过一定值而进行稳定计算时， $f_w < f$ ，常以一折减系数 φ 和设计强度的乘积表示稳定计算设计强度。所以稳定条件为

$$\sigma_w \leq \varphi f \quad (2-3)$$

三、疲劳强度规定

构件在连续反复的荷载作用下，虽然应力低于构件材料的极限强度，甚至还低于设计强度，也会发生破坏，这种现象称为疲劳断裂。疲劳破坏是一种突然发生的破坏，疲劳断裂的主要特征是在即将破坏之前缺少塑性变形。由于构件破坏之前没有明显的变形，致使及时发现这样的断裂成为一件很困难的事。

确定疲劳强度条件，主要目的是防止结构或构件在使用寿命期间产生疲劳断裂。以往的方法是采用验算最大应力的方法，即

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma^p] \quad (2-4)$$

式中 σ_{\max} ——在反复荷载作用下，构件或连接处的最大应力；

$[\sigma^p]$ ——材料的疲劳许用应力，是应力比 $\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ 和应力循环次数的函数。

这种方法亦称安全寿命法，其基础是构件在整个规定的寿命期间不产生疲劳裂缝，结构或构件的安全寿命是可以预期估计的。

近年来发展的允许应力幅法，是伴随着焊接钢结构发展起来的一种疲劳计算方法。这种方法的出发点是：在实际上要假定完全防止产生裂缝是不可能的。通过大量试验研究和工程实践证明：焊接缺陷往往是形成疲劳裂缝和引起疲劳破坏的根源。对焊接结构来说，焊缝附近存在着很大的焊接残余拉应力，其数值可达到材料的屈服强度 f_y 的数量级。因此，疲劳裂缝总是产生于连接部位的焊缝、熔合线的表面和焊缝内部的缺陷处，然后裂缝沿垂直于外力作用方向扩展。实验证明该处的实际应力状态与名义上的最大应力 σ_{\max} 相差较大。在裂缝的形成和扩展过程中，应力循环的实际状态是由接近屈服强度的最大应力按应力幅 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 变化， σ_{\max} 和 σ_{\min} 只是名义上的最大和最小应力，而裂缝扩展阶段的裂缝扩展速率主要由应力幅控制，应力幅 $\Delta\sigma$ 是控制焊接结构的疲劳寿命的最主要的应力变量。

井架及底座绝大多数是焊接结构，其疲劳强度规定为^[9]

$$\Delta\sigma \leq [\Delta\sigma] \quad (2-5)$$

式中 $[\Delta\sigma]$ ——许用应力幅度；

$\Delta\sigma$ ——计算应力幅度。

四、动力反应的规定

井架与底座承受的荷载，其中大多数荷载属于动力荷载。但经验和工程实践表明，在大多数情况下动力作用是比较小的，在设计计算中引用一个动载系数，对动力荷载作用进行补偿。这样的方法是可以信赖的。

尽管如此，有些荷载产生的动力作用，仍然在先进的设计和精确的计算中需要考虑。考虑动力作用不仅从结构强度观点出发，有时尚须考虑钻机的操作者和井架工的感觉，避免引起他们的烦躁和不安。这方面的研究成果还很少，真正地解决这一问题需要透彻地了解整个钻井系统包括动力设备、绞车、转盘、钻具、井架及底座等的动力特性。

井架及底座在荷载作用下，其动力反应情况可分为以下几类：

1. 由起下钻作业中的动力荷载及钻进过程中的冲击荷载引起结构系统的振动。
2. 由大风、阵风及波浪所产生的晃动。
3. 由地震引起垂直于地面的振动。
4. 由于安装在钻台上的转盘、绞车及动力机的运转引起的振动和可能的共振。
5. 当阵风的脉动频率接近（或等于）结构的自振频率时，引起的风振。

上述所列问题，在目前的计算方法中，第一类问题通过采用最大钩载作为计算荷载加以补偿；第二类问题对钻井船和半潜式平台上工作的井架、底座，采用加动力惯性荷载的办法加以考虑；对第三、五类问题均引入专门的荷载系数，加入设计荷载；对第四类问题，一直被设计师们所忽略。在设计新钻机系统时，应充分利用现代计算技术进行钻井系统的振动综合分析，共振问题，跳动问题等引起操作人员不安的问题都应加以考虑。

五、脆性断裂的规定

构件或构件之间的连接在一定的条件下也可能发生脆性断裂。

根据断裂力学分析，构件中经常有宏观裂缝存在。如在焊接过程中可能产生的裂缝，即使原来没有宏观裂缝，其内部的微观缺陷，如夹渣，微孔等也会在外加应力的作用下发展成为宏观裂缝。如果裂缝保持稳定而不发展，或扩展而没有达到临界尺寸，构件就能安全地使用；如果裂纹失稳扩展，则将导致构件迅速断裂。裂缝处于韧性状态的材料中，裂缝扩展必须有外力做功，如果外力停止做功，裂缝就停止扩展，这种情况的结果往往是由疲劳引起断裂。裂缝处于脆性状态的材料中，裂缝的扩展几乎不需要有外力做功，仅裂缝起裂时，从拉应力场中释放出的弹性能即可驱动裂缝极为迅速地扩展。对焊接钢结构，由于有焊接残余应力存在，当裂缝一旦起裂，除构件材料具有足够的断裂韧性，否则的话，它将迅速扩展直至整个构件或连接断裂。

尽管到目前为止，尚没有见到井架与底座因脆性断裂引起失效的报道，但随着井架及底座结构设计中采用大型的焊接板梁，为简化整体结构，单个构件变得粗大，必须注意防止脆性断裂的发生，特别是处在寒冷地域工作的井架底座，在设计中应该注意：

1. 尽量不要采用厚度大于 20 mm 的钢板制作构件^[10]。
2. 采用低碳合金钢或镇静钢。

六、塑性规定

制造井架及底座的金属材料绝大多数是钢材，有明显的屈服点。各种类型的结构实验表明，当结构中某一部位的应力达到屈服强度时，并不一定意味着构件或有关连接整个地破坏。在构件中某一点应力达到屈服强度时，并不会自动地导致该点处无约束的塑性流动和截面破坏。在整个结构中和支承约束处也是这样。大庆石油学院进行的井架模型试验亦得到相同的结果，即杆系结构在进入弹塑性阶段后，结构仍然存在着一一定的承载能力。

考虑到井架及底座承受的荷载大多数为动力荷载，以及结构破坏对钻井设备、钻井投资造成的损失，在井架及底座的主体结构或杆件的计算承载能力中不允许包括结构的弹塑性阶段的承载能力。除个别支承处的局部接触及挤压应力考虑塑性影响外，其它构件的计算应力均不允许进入塑性状态。结构或构件在弹塑性阶段的承载能力可作为井架、底座的安全储备承载能力。

七、小结

对于井架和底座来说，很少可能仅由一种规定来控制设计，静强度、不稳定性、疲劳强度、动力反应以及脆性断裂等项规定都可以恰当地应用在各种井架及底座的设计计算之

中。只有综合使用这些计算规定，才能获得合理的、经济的、安全的结构设计。

第二节 设计算法

一、设计算法概述

结构设计计算概括地说，要考虑两个基本变量，一是结构的荷载效应——作用在结构上的荷载产生的结构内力，如轴力、弯矩、剪力、扭矩等；其二是结构的抗力——结构承受荷载和变形的能力，如截面强度、杆件的刚度和稳定性等。

根据对荷载效应 S 和结构抗力 R 这两个基本变量的描述，形成不同的设计计算方法。若将 S 和 R 描述为“确定性”的变量，则相应的设计计算方法就是大家熟知的允许应力计算法。若从概率统计的观点出发，认为 S 和 R 具有随机性，即结构承受的各种荷载具有随机性，不仅可变荷载具有随机性，就是构件自重等恒定荷载也具有随机性；其次，由于结构材料性能和构件尺寸等也都具有随机性，所以结构抗力也不可避免地具有随机性。与此相适应的是概率设计算法。结构的概率设计算法按其发展过程分为三个水准^[1]，即水准Ⅰ——半概率算法，水准Ⅱ——近似概率算法，水准Ⅲ——全概率设计法。下面重点讨论目前应用的近似概率算法。

二、近似概率算法

近似概率算法是以概率理论为基础的极限状态算法。结构按承载能力极限状态和正常使用极限状态设计，采用可靠指标来度量结构可靠度。

1. 几个基本理论问题

(1) 结构的功能函数和极限状态

结构的工作性能可用结构功能函数来描述。若结构设计需要考虑影响结构可靠性的随机变量有 n 个，即 x_1, x_2, \dots, x_n ，则这 n 个随机变量间通常可建立函数关系

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2-6)$$

Z 即为结构功能函数。

在目前的水平上，一般只以结构或构件的荷载效应 S 和抗力 R 这两个基本随机变量来表达结构的功能函数，即

$$Z = g(R, S) = R - S \quad (2-7)$$

功能函数 Z 是随机变量 S 、 R 的函数，也是一个随机变量。在工程实际中，可能出现下列三种情况：

$$\begin{aligned} Z > 0 & \quad \text{结构可靠} \\ Z < 0 & \quad \text{结构失效} \\ Z = 0 & \quad \text{结构处于极限状态} \end{aligned}$$

结构的极限状态是结构由可靠转变为失效的临界状态。极限状态的定义为：若结构或结构的某一部分超过某一特定的状态就不能满足某一规定功能要求，则此特定状态称为该功能的极限状态。对井架及底座结构来说，结构的极限状态可分为承载能力极限状态和正常使用的极限状态两种情况。

井架及底座的承载能力极限状态对应于其结构或构件的最大承载能力，结构或构件成为下列状态之一时，即认为超过了承载能力极限状态：

- 1) 整个结构或其一部分作为刚体失去平衡（如倾覆等）；