

文章编号:1005-9865(2011)01-0100-05

超深水钻井作业隔水管顶张力确定方法

鞠少栋¹, 畅元江¹, 陈国明¹, 许亮斌², 殷志明²

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中海油研究中心, 北京 100027)

摘 要:对于深水和超深水钻井作业,确定钻井隔水管系统顶张力是钻前设计非常重要的工作。研究三种隔水管系统顶张力确定方法,分别是理论方法、基于隔水管系统底部残余张力方法和基于下放隔水管系统的最大钩载方法。算例计算与超深水钻井实践对比表明,在相同的隔水管系统配置下,三种方法计算结果都接近于实际钻井作业时的顶张力设定值。但研究认为,基于下放最大钩载的顶张力计算方法简单实用,推荐作为优选方法。

关键词:超深水; 钻井隔水管; 顶张力; 确定方法

中图分类号:P751 **文献标识码:**A

Determination methods for the top tension of ultra-deepwater drilling risers

JU Shao-dong¹, CHANG Yuan-jiang¹, CHEN Guo-ming¹, XU Liang-bin², YIN Zhi-ming²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China; 2. China Offshore Oil Research Center, Beijing 100027, China)

Abstract: In deepwater and ultra-deepwater drilling operation, the determination of top tension of drilling riser system for pre-spud design is the main consideration. Three determination methods of top tension of drilling riser system are proposed, which are theoretical method, method based on the residual tension at bottom of the drilling riser system, and method based on the maximal hook load during the running procedure of the drilling riser system respectively. An example is presented and its results by different methods are compared with the ultra-deepwater drilling practice, which illustrates that all the values by different methods fit well with the pre-defined value of the top tension in the actual drilling operation in case of the identical drilling riser configuration. The research indicates that the method based on the maximal hook load during the running procedure of the drilling riser system is simple and applicable, which is recommended as the preferred method for determination of the top tension.

Key words: ultra-deepwater; drilling riser; top tension; determination methods

(超)深水钻井隔水管是连接海底井口与钻井船的重要部件,其主要功能是提供井口防喷器与钻井船之间钻井液往返的通道,支撑辅助管线,引导钻具,作为下放与撤回井口防喷器组的载体等^[1-2]。隔水管张力器用于向钻井隔水管顶部施加垂直力,从而控制其应力和位移,在深水钻井船因风、海浪和海流的影响而垂向、横向移动时,张力器能够为隔水管提供近乎恒定的轴向拉力^[3]。

合理设计的张力器张力可以防止隔水管发生屈曲、限制隔水管底部挠性接头转角以及确保钻杆以较小的摩擦力在隔水管内上下运动或旋转,理论上要求隔水管顶部的张力必须高于隔水管和钻井液的表现重量(即为没水重量),同时隔水管上需要施加额外的载荷以限制其弯曲应力^[4-5]。关于隔水管顶张力的计算,国外普遍采用 API 规范的理论方法,计算过程繁琐且不适于现场作业应用^[6]。目前我国正致力于超深水油气

收稿日期:2010-04-30

基金项目:国家科技重大专项课题资助项目(2008ZX05026-001-07);国家自然科学基金项目(50904078);中国石油大学优秀博士学位论文培育资助项目(Z10-08)

作者简介:鞠少栋(1984-),男,山东潍坊人,博士生,主要从事深水钻井技术与装备的研究。E-mail: jsd1984@126.com

田勘探开发,超深水域相对恶劣的海况对钻井隔水管系统的张力设置提出了更高的要求,确定隔水管顶张力算法并形成指导现场作业行之有效的方法对于保证整个隔水管系统的作业安全具有重要意义。

研究三种确定隔水管顶张力的计算方法,分别为防止隔水管失稳的理论算法、基于隔水管底部残余张力算法和适合于海洋钻井作业的现场计算方法。算例根据某超深水井隔水管系统配置,结合底部挠性接头处张力需求和隔水管屈服强度要求,分别计算了采用不同算法的顶张力计算值,并与现场作业实际的设置张力进行了对比分析。本方法与相关结论可为我国超深水钻井隔水管系统顶张力的设计提供依据。

1 隔水管顶张力计算方法

1.1 理论算法

根据 API RP 16Q 规范,顶张力设置是确保隔水管稳定性的条件之一。顶张力的设置要确保即使有部分张力器失效,也能保证隔水管底部会产生有效张力。最小顶张力 $T_{\min}$ 按如下公式确定:

$$T_{\min} = T_{\text{SRmin}} N / [R_f (N - n)] \quad (1)$$

式中: T_{SRmin} 为滑环环张; N 为支撑隔水管的张力器数目; n 为出现突然失效的张力器数目; R_f 为用以计算倾角和机械效率的滑环处垂直张力与张力器设置之间的换算系数,通常为 0.90 ~ 0.95。

式(1)中滑环张力 T_{SRmin} 计算公式:

$$T_{\text{SRmin}} = W_s f_{\text{wt}} - B_n f_{\text{bt}} + A_i [d_m H_m - d_w H_w] \quad (2)$$

式中: W_s 为参考点之上的隔水管没水重量; f_{wt} 为没水重量公差系数(除精确测量外,一般取 1.05); B_n 为参考点之上的浮力块净浮力; f_{bt} 为因弹性压缩、长期吸水和制造容差引起的浮力损失容差系数(除精确测量外,一般取 0.96); A_i 为隔水管(包括节流、压井和辅助管线)内部横截面积; d_m 为钻井液密度; H_m 为至参考点的钻井液柱高度; d_w 为海水密度; H_w 为至参考点的海水柱高度。

为了确定隔水管最小顶张力,还需要计算隔水管没水重量、隔水管净浮力以及隔水管内部钻井液横截面积等相关参数。

隔水管没水重量:

$$W_s = \sum W_r N_r \quad (3)$$

式中: W_r 为隔水管单根没水重量, N_r 为隔水管单根数目。

隔水管净浮力:

$$B_n = \sum B_{\text{buoy}} N_{\text{buoy}} \quad (4)$$

式中: B_{buoy} 为浮力单根净浮力, N_{buoy} 为浮力单根数目。

隔水管内部钻井液横截面积:

$$A_i = A_{\text{riser}} + A_{\text{kill}} + A_{\text{choke}} + A_{\text{booster}} + A_{\text{hydraulic}} \quad (5)$$

式中: A_{riser} 为隔水管主管内部横截面积, A_{kill} 为压井管线内部横截面积, A_{choke} 为节流管线内部横截面积, A_{booster} 为增压管线内部横截面积, $A_{\text{hydraulic}}$ 为液压管线内部横截面积。

1.2 基于底部残余张力的顶张力确定方法

法国石油研究院提出的隔水管顶张力计算必须保证隔水管底部挠性接头处的残余张力等于或大于隔水管底部总成(lower marine riser package, 简称 LMRP)的表观重量,以确保恶劣海况条件下启动紧急脱离程序时能够安全提升整个隔水管系统。

隔水管顶张力 T_{top} 计算公式:

$$T_{\text{top}} = \sum_{\text{top}}^{\text{bottom}} (W_{\text{riser}} + W_{\text{mud}}) + RTB \quad (6)$$

式中: W_{riser} 为隔水管表观重量, W_{mud} 为钻井液表观重量,底部残余张力 RTB (residual tension at bottom, 简称 RTB) 为隔水管底部残余张力(一般等于或稍大于 LMRP 的表观重量)。

$$W_{\text{riser}} = W_{\text{MP}} + W_{\text{PL}} + W_{\text{B}} \quad (7)$$

式中: W_{MP} 、 W_{PL} 和 W_{B} 分别为隔水管主管、外围管线和浮力块的表观重量。

1.3 基于下放钩载的顶张力确定方法

该方法的提出源于现场钻井作业经验,普遍适用于深水 and 超深水钻井隔水管顶张力设置。钻井作业前,需要针对每口井进行详细的隔水管系统配置,并计算下放隔水管和防喷器(blowout preventor,简称 BOP)系统时大钩所承受的最大载荷。根据我国南海深水区块多口井钻井作业日报,现场作业时,下放 BOP 到井口位置后至 BOP 与海底高压井口连接之前,需要进行张力器张紧力设置。一般可以按 7:3 或 8:2 的比例将此时的大钩载荷(也即下放重量)重新分配给张力器和大钩,也就是说,隔水管张力器张力设置值一般取作业时大钩最大下放重量的 70% 或 80%,一般情况下在正常钻井作业过程中不再对其进行调整,除非遭遇恶劣天气或者钻井过程中采用大密度钻井液。

隔水管张力器设置张力 T 计算公式:

$$T = \eta W_{hook} \tag{8}$$

式中: η 为张力器张力所占最大下放重量的比例, W_{hook} 为大钩所承受的最大下放重量,也即 BOP 与海底高压井口即将连接时的最大钩载。理论上,最大钩载计算应考虑隔水管和 BOP 系统下放过程中由于钻井船升沉运动所产生的动载效应的影响,其值可通过系统轴向动力学分析获得。实际上,由于隔水管与 BOP 系统的下放作业常常在较好的海况条件下进行,钻井船的升沉运动相对较小,于是忽略动载效应可满足现场钻井作业的需要。

2 算例及现场应用

以某超深水井为例,水深近 1 600 m,钻井作业时配置的隔水管系统如表 1 所示,隔水管系统配置使用两种浮力单根和四种隔水管短节。海水密度为 1 025 kg/m³,采用的钻井液最大密度为 1 140 kg/m³。

隔水管单根各部分基本结构参数如表 2 所示,隔水管主管四周总共布置 5 根周围管线,包括节流、压井、泥浆增压管线各 1 根,液压管线 2 根。

表 1 隔水管系统配置

Tab. 1 Configuration of drilling riser system

隔水管部件	数量	单根长度/m	单根湿重/t
LMRP/BOP	1	16.780	331.640
裸单根	13	22.860	12.831
浮力单根 2	26	22.860	2.540
浮力单根 1	27	22.860	0.415
隔水管短节 1	1	6.096	5.510
隔水管短节 2	1	4.572	4.520
隔水管短节 3	1	3.048	3.448
隔水管短节 4	1	1.524	2.458
伸缩节	1	30.670	31.103
挠性接头	1	3.350	5.434

表 2 隔水管单根结构参数

Tab. 2 Parameters of drilling riser joint

名称	数量	外径/(in/m)	内径/(in/m)
隔水管主管	1	21.0/0.533 4	19.25/0.489 0
节流管线	1	6.75/0.171 5	4.5/0.114 3
压井管线	1	6.75/0.171 5	4.5/0.114 3
泥浆增压线	1	5.0/0.127 0	4.0/0.101 6
液压管线	2	4.25/0.108 0	3.5/0.088 9

2.1 隔水管顶张力理论计算结果

根据 API 规范,确定隔水管顶张力时需要的参数计算如下:隔水管没水重量为 12.831 t,浮力单根 1 浮力块净浮力为 12.416 t,浮力单根 2 浮力块净浮力为 10.291 t。隔水管没水重量公差系数取 1.05,浮力块浮力损失公差系数取 0.96,垂直张力与张力器设置之间的换算系数取 0.90。

支撑隔水管系统的张力器数目为 6,假定突然失效的张力器数目为 0,根据式(1)和式(2)隔水管系统滑环张力 T_{SRmin} 和顶张力 T_{min} 计算结果如表 3 所示,隔水管滑环张力为 405.19 t,顶张力为 450.21 t。

隔水管顶张力与钻井液密度关系如图 1 所示,随着钻井液密度的增大,隔水管系统所需的滑环张力和顶张力呈线性增大,根据此图可确定不同钻井液密度下的隔水管顶张力。

表 3 隔水管滑环张力和顶张力计算结果

Tab. 3 Calculation results of slip ring tension and top tension for drilling riser

海水密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	隔水管没水重量/t	浮力块净浮力/t	名义湿重/t	滑环张力/t
1 025	891.45	602.80	288.65	405.19
泥浆密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	API 规范没水重量/t	API 规范净浮力/t	API 规范湿重/t	顶张力/t
1 140	936.02	578.69	357.33	450.21

2.2 底部残余张力法计算结果

根据式(6)和式(7),隔水管顶张力计算结果如表 4 所示,隔水管表观重量为 288.65 t,钻井液表观重量为 47.85 t,底部残余张力 RTB 值取为 LMRP 的表观重量 107 t,则隔水管顶张力为 443.50 t。

表 4 隔水管顶张力计算结果

Tab. 4 Calculation results of top tension for drilling riser system

隔水管表观重量/t	钻井液表观重量/t	RTB/t	顶张力/t
288.65	47.85	107	443.50

隔水管顶张力与底部残余张力之间对应关系如图 2 所示,随着底部残余张力的增加,所需求的顶张力线性增加。

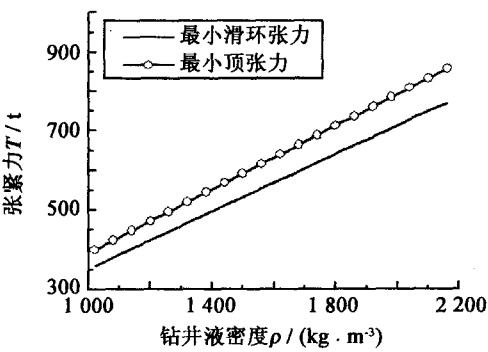


图 1 隔水管顶张力与钻井液密度关系

Fig. 1 Relationship between drilling fluid density and top tension

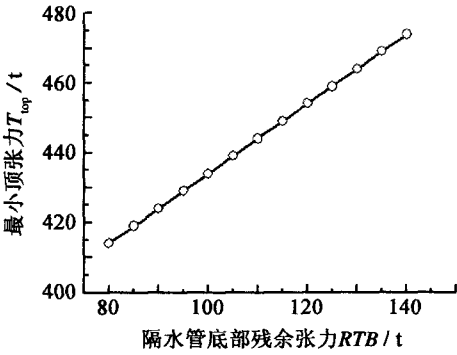


图 2 隔水管顶张力与底部残余张力关系

Fig. 2 Relationship between top tension and residual tension on bottom

2.3 下放钩载法计算结果

根据前述算法,结合表 1、2 给出的超深水钻井隔水管系统详细配置,下放隔水管系统时,其下放单根数量与大钩载荷变化对应关系曲线如图 3 所示。图中大钩载荷变化平缓的区域为隔水管浮力单根下放区域,而变化较大的区域为隔水管裸单根下放区域。计算得到的大钩载荷值起始于 LMRP/BOP 和最底部连接 LMRP/BOP 的 2 根浮力单根入水后,其最大值发生时间为隔水管系统部件全部下放之后至 LMRP/BOP 与海底高压井口连接前。

由于隔水管系统的最大下挂重量为 642.51 t,按 7:3 的比例重新分配给张力器和大钩,其中张力器张力为 449.76 t,大钩载荷为 192.75 t,由式(8)可得到隔水管顶张力计算结果,如表 5 所示。

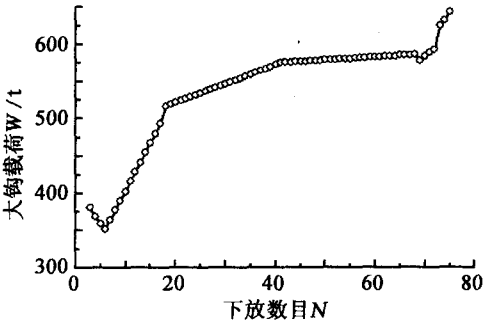


图 3 隔水管部件下放数目与大钩载荷关系

Fig. 3 Relationship between hook load and running joints for drilling risers

表 5 隔水管总湿重和设置顶张力计算结果

Tab. 5 Calculation results of top tension and overall wet weight for drilling riser system

隔水管总湿重/t	钻井液表观重量/t	设置顶张力/t	隔水管底部有效张力/t	LMRP 重量/t	脱离时过提力/t
288.65	47.85	449.76	113.26	107	54.11

根据表 5, 隔水管的顶张力为 449.76 t, 正常作业时隔水管底部有效张力为 113.26 t, 紧急脱离情况下 LMRP 的过提力为 54.11 t。

2.4 三种方法的计算结果对比

三种方法都以确保隔水管系统全部湿重由张力器承担及隔水管的安全脱离为前提条件, 从不同角度出发分别基于隔水管稳定性、底部残余张力和大钩载荷计算顶张力。在相同的隔水管系统配置条件下, 三种计算方法的结果: 采用 API 规范理论方法求得的隔水管系统顶张力为 450.21 t, 采用其他两种方法计算出的隔水管系统顶张力分别为 443.50 t 和 449.76 t。根据现场钻井记录, 此井现场实际作业时 6 个张力器的设置为 161 kips (73.094 t)、161 kips (73.094 t)、165 kips (74.91 t)、163 kips (74.002 t)、162 kips (73.548 t) 和 163 kips (74.002 t), 张力器提供的全部顶张力为 442.65 t。对比表明, 三种方法计算结果与现场实际顶张力设置相差不大, 其所得结果都可直接应用于隔水管现场作业。前两种方法需要确定的参数较多且各个参数的计算繁琐, 而第三种方法只需要获得大钩载荷即可确定顶张力。考虑第三种方法的简便性, 对于我国超深水现场钻井作业推荐采用此方法。

3 结 语

1) 研究三种隔水管系统顶张力确定方法, 分别是理论方法、基于隔水管系统底部残余张力方法和基于下放隔水管系统的最大钩载方法, 并就每一种方法给出了理论依据或原理。

2) 分别采用三种方法进行算例计算并与现场作业参数对比, 实际钻井作业顶张力设定值为 442.65 t, 三种方法计算结果分别为 450.21 t、443.50 t 和 449.76 t, 表明与现场作业实际顶张力设置值吻合较好。

3) 研究认为, 理论算法可考虑多个因素的影响, 适应范围较广但计算繁琐; 基于隔水管系统底部残余张力方法计算简单但适用性较差; 基于下放隔水管系统的最大钩载方法简单实用, 推荐作为首选方法。

参考文献:

- [1] 畅元江, 陈国明, 孙友义, 等. 深水钻井隔水管的准静态非线性分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 114-118.
- [2] 畅元江. 深水钻井隔水管设计方法及其应用研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2008.
- [3] API RP 16F, Specification for marine drilling riser equipment[S]. 2004.
- [4] Guesnon J, Gaillard C h, Richard F. Ultra deep water drilling riser design and relative technology[J]. Oil & Gas Science and Technology, 2002, 1(57): 39-57.
- [5] Persent E, Guesnon J, Heitz S, et al. New riser design and technologies for greater water depth and deeper drilling operations[C]// SPE 119519. 2009.
- [6] API RP 16Q, Recommended practice for design selection operation and maintenance of marine drilling riser system[S]. 2001.