

金属塔架结构静态力学性能研究***

王 伟 陈 淮 马成刚 阴振亚

(郑州工学院)

(中原油田)

摘 要: 本文以油田金属钻井塔架为实际工作背景, 结合使用及再建塔架承载情况及工作情况, 分析了油田金属钻井塔架的静态力学性能以及考虑塔架局部杆件刚度退化后对塔架整体力学性能的影响, 所得结果可为设计新型塔架提供参考。

关键词: 金属塔架, 静态, 力学性能

中图分类号: TB121

金属刚架系统在许多生产部门有着广泛的应用, 例如, 石油工业中的钻井井架, 它是石油工业生产设备中的重要组成部分之一, 对油田生产起着重要作用, 其特征为形体大, 承载重, 工作环境恶劣复杂。这部分设备使用是否合理, 管理是否妥当, 对油田的经济效益、安全保障具有直接的影响。目前, 我国对现有钻井井架的许用分类标准以及井架的报废标准都是以经验为基础的, 没有充分的力学分析计算依据, 这样必然会造成不必要的浪费, 甚至威胁生产安全。所以对金属塔架结构进行详细受力分析, 具有深刻的现实意义。在此情景下, 本文根据油田使用及再建钻井塔架的承载情况及工作情况, 考虑完整结构及塔架杆件在搬迁拆卸发生局部破损情况, 对钻井塔架进行了静态力学性能分析, 所得结果可为我国石油工业建设服务。

1 分析模型

本文结合石油钻井塔架的结构特点, 以杆系结构有限单元法为理论基础, 将石油钻井塔架抽象为腿杆连续整体空间刚桁架模型, 假定: 塔架大腿为一维连续体, 将其抽象为空间梁单元; 腹杆与大腿铰接联接, 将其抽象为空间杆单元, 横膈与大腿刚接, 将其抽象为空间梁单元。取塔架整体空间坐标系如图 1 所示, 其中, z 轴与塔架纵轴一致, x 、 y 轴为水平轴。

* 河南省自然科学基金资助项目

* * 收稿日期: 1994-11-07

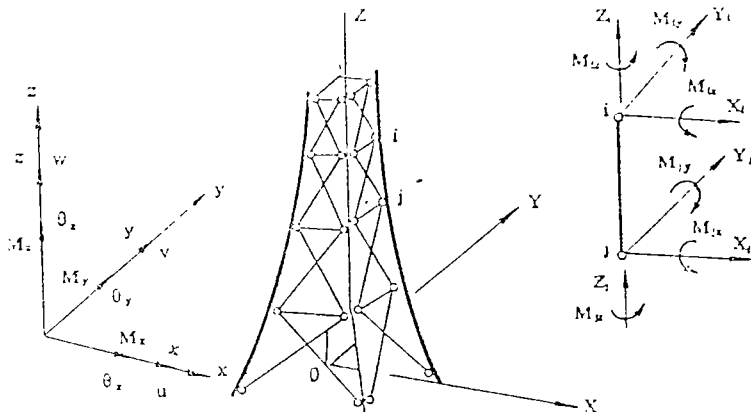


图 1 大腿连续的塔架计算简图

在整体坐标系中, 一般情况下, 塔架的每个结点有六个自由度。塔架第 i 结点在整体坐标系下的位移向量为:

$$\{\bar{\delta}_i\} = [u_i \quad v_i \quad w_i \quad \theta_{xi} \quad \theta_{yi} \quad \theta_{zi}]^T \quad (1)$$

塔架第 i 结点在整体坐标系下的结点力向量为:

$$\{\bar{P}_i\} = [X_i \quad Y_i \quad Z_i \quad M_{xi} \quad M_{yi} \quad M_{zi}]^T \quad (2)$$

结点位移与结点力向量均以与坐标轴正方向一致为正, 并符合右手定则。

对于均质的空间刚架梁单元和桁架杆单元, 其单元在局部坐标系下的单元刚度矩阵显式表达式 $[k]^e$ 可见文献[1]。对于塔架结构中的每一个杆件单元, 其坐标转换关系为

$$\{\delta\}^e = [T]\{\bar{\delta}\}^e \quad (3)$$

$$[\bar{k}]^e = [T]^T [k]^e [T] \quad (4)$$

式中, $\{\delta\}^e$ 、 $\{\bar{\delta}\}^e$ 分别为单元在局部坐标系和整体坐标系中的结点位移向量; $[T]$ 为坐标变换矩阵。

在按 (3) 式进行了把单元局部广义坐标转化为系统总体广义坐标的坐标变换后, 可以按 (4) 式得到单元在整体坐标系下的单元刚度矩阵 $[\bar{k}]^e$, 利用结构力学中的直接刚度法^[2], 组集各单元刚度矩阵, 即可得到结构总体刚度矩阵。

钻井塔架在搬迁过程中, 塔体杆件 (例如钻井井架的腿杆) 有可能发生局部破损, 损伤部位的刚度将发生退化, 以致影响整个结构的刚度分布和承载能力。为了解决这一问题, 本文假设: 损伤部分由原来连续的刚接退化为可以转动的铰接, 即在结构的损伤部位加一个铰结点, 则在结构中将出现一种一端刚接另一端铰接联接的单元。此类问题从一般意义上讲, 可以归结为结构的约束自由度释放问题^[4] (释放退化结点的转角自由度)。空间梁单元释放转角自由度后的单元刚度矩阵显式表达式详见文献[3]。

2 工程实例分析

本文以油田钻井生产常用的空间四边型塔架为例进行分析计算。最早被用于钻井生产的塔架, 是目前用量很广泛的一种钻架, 它是现场拼接式的钢结构, 各杆均由螺栓或法兰

盘联接。塔架的计算模型如图 2 所示。

从整体上看，塔架属于一种大腿连续、腹杆铰接的整体空间刚、桁架混合结构。本文计算模型取 31 个塔架结点，84 个单元，其中，空间梁单元 44 个，空间桁架单元 40 个，结构总自由度数 162 个。结点和单元编号如图 2 所示。

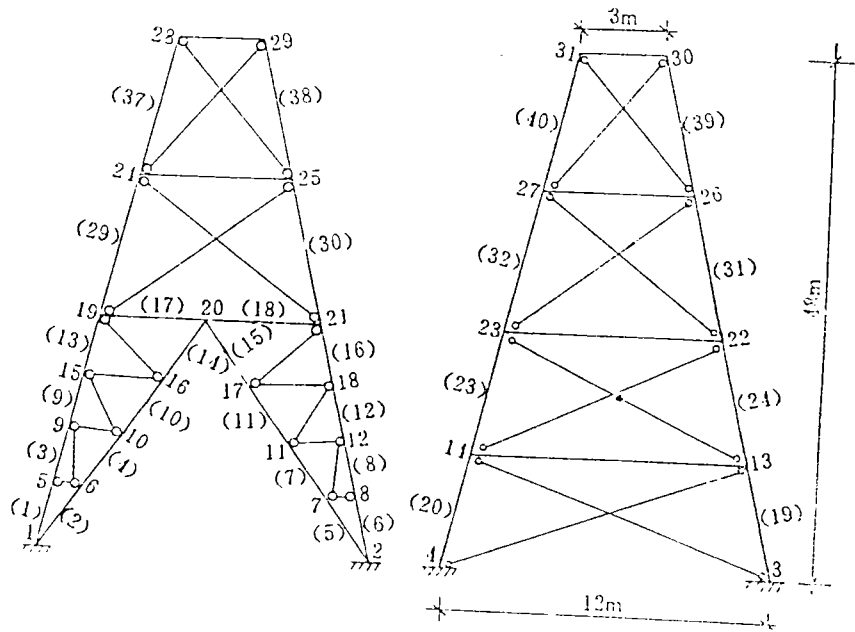


图 2 塔架计算模型简图

油田钻井塔架不同于一般的金属刚架结构，重型钻机工作荷载是油田钻架的重要负荷，作为初步研究，这里只分析塔架在 3000KN 钻机荷载作用下的承载能力，则每个大腿顶点承受 750KN 竖向向下荷载，分析塔架完好结构工况以及塔架在搬迁拆卸过程中可能造成部分杆件出现局部损伤工况下的静态力学性能。限于篇幅，全部计算结果不能一一列出，在力求反映塔架力学性能的前提下，以下给出：（1）内力、变位较大值；（2）结构变位图。

2.1 3000KN 钻机荷载作用下，完好塔架工况的内力与变位分析

在 3000KN 钻机荷载作用下，结构的变位情况如图 3 所示，较大值内力如表 1 所示，较大值位移如表 2 所示。

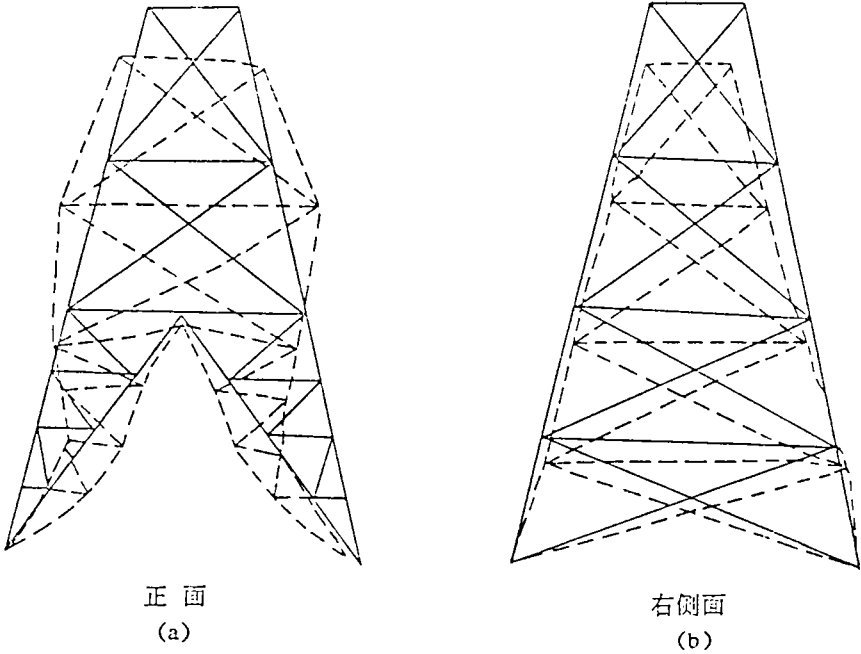


图 3 位移示意图

表 1 较大值内力计算表

单元号	I 端结点号	$\bar{X}(N)$	$\bar{Y}(N)$	$\bar{Z}(N)$	$M_x(N.m)$	$M_y(N.m)$	$M_z(N.m)$
	J 端结点号						
16	18	6.880E+05	-2.682E+01	3.187E+02	-5.84E+01	9.373E+02	5.916E+01
	21	-6.880E+05	2.682E+01	-3.187E+02	5.84E+01	-9.3915E+02	-2.215E+01
12	12	6.856E+05	7.221E+01	-2.375E+02	-5.857E+01	9.3915E+02	2.215E+01
	18	-6.856E+05	-7.221E+01	2.375E+02	5.857E+01	4.462E+02	2.156E+02
8	8	6.764E+05	-5.205E+01	1.080E+03	3.425E+02	-4.736E+02	-2.027E+02
	12	-6.764E+05	5.205E+01	-1.080E+03	-3.425E+02	-6.063E+03	-1.123E+02
6	2	6.761E+05	2.680E+01	-2.638E+03	3.415E+02	6.063E+03	-1.122E+02
	8	-6.761E+05	-2.680E+01	2.638E+03	-3.415E+02	9.905E+03	5.004E+01
30	21	5.752E+05	-1.557E+02	2.019E+01	-1.834E+02	-1.744E+02	-1.765E+03
	25	-5.752E+05	1.557E+02	-2.019E+01	1.834E+02	-7.002E+01	-1.199E+02
38	25	6.305E+05	-9.766E+01	-4.59	2.33E+02	7.95E+01	-3.253E+02
	29	-6.305E+05	9.766E+01	4.59	-2.33E+02	-2.45E+01	-8.569E+02

表 2 较大值位移计算表

结点号	u(m)	v(m)	w(m)
29	8.00798D-03	6.26760D-04	-2.06597D-02
28	-7.76168D-03	7.02083D-04	-1.866667D-02
10	2.64053D-02	5.00771D-02	-1.69158D-02
25	1.55897D-03	6.32353D-04	-1.500557D-02
24	-1.11710D-03	6.32353D-04	-1.45491D-02
6	2.692D-02	2.613D-04	-2.05D-02
16	1.574D+02	1.257D+02	-5.275D-03
20	2.3816D-05	3.34D-03	-4.809D-02

由表 2 和图 3 可以看出, 在该工况下, 塔体纵向发生整体压缩变形, 在 xoz 平面内, 塔架上部发生伸展变形, 下部发生收缩变形; 在 yoz 平面内, 塔架整体收缩。由于塔身整体对称于 yoz 平面, 而且顶部承受对称荷载, 所以, 塔架整体不发生扭转变形。塔架最大变位点位于正面塔顶处的 29 结点, 最大竖向线位移量为 2.06cm, 相应地其它位移分量分别为 $u=0.8\text{cm}$, $v=0.06\text{cm}$ 。由表 1 知, 塔架最大轴向力发生在 16 单元 (正面大腿中部), 杆端最大轴力 $6.88\times 10^5\text{N}$ 。在此情况下, 塔架正面大腿中部是承载最不利位置。

2.2 塔架部分杆件局部刚度退化工况的结构分析

本文把塔架局部杆件存在缺陷问题模拟为塔架刚度退化问题 (失去抗弯及抗扭能力) 进行分析。从上面完整结构工况静力计算结果可以看出, 塔架的四根大腿是承载最大的杆件, 而且在塔架的搬迁拆卸过程中, 腿杆的损伤情况也较严重, 所以, 本文分别对塔架前面大腿和后面大腿的上、中、下三个部位进行自由度释放处理, 即把原来的一维连续体改

表 3 较大值内力计算表

单元号	I 端结点号	$\bar{X}(N)$	$\bar{Y}(N)$	$\bar{Z}(N)$	$M_x(N\cdot M)$	$M_y(N\cdot M)$	$M_z(N\cdot M)$
	J 端结点号						
16	21	6.880E+05	-2.680E+01	3.187E+02	-5.810E+01	-9.374E+02	5.922E+01
	18	-6.880E+05	2.680E+01	-3.187E+02	5.810E+01	-9.915E+02	-2.214E+02
12	18	6.856E+05	7.223E+01	-2.375E+02	-5.823E+01	9.915E+02	2.214E+02
	12	-6.856E+05	-7.223E+01	2.375E+02	5.823E+01	4.463E+02	2.158E+02
8	12	6.764E+05	-5.2022E+01	1.080E+03	3.396E+02	-4.734E+02	-2.025E+02
	8	-6.764E+05	5.2022E+01	-1.080E+03	-3.396E+02	-6.063E+03	-1.124E+02
30	21	5.752E+05	-1.557E+02	2.202E+01	-1.819E+02	-1.744E+02	-1.765E+03
	25	-5.752E+05	1.557E+02	-2.202E+01	1.819E+02	-7.013E+01	-1.200E+02

为一端固接另一端铰接的特殊梁单元，再计算自由度释放后的结构内力与变位。

表 4 较大值位移计算表

结点号	u(m)	v(m)	w(m)
29	8.01021D-03	6.26604D-03	-2.06597D-02
28	-7.76391D-03	7.01179D-04	-1.86670D-02
25	1.55877D-03	3.32257D-03	-1.50055D-02
24	-1.11691D-03	6.93786D-04	-1.45497D-02

文献[3]经计算表明，塔架前腿杆件自由度释放和塔架后腿杆件自由度释放对塔架的内力和变位影响不大。限于篇幅，下面只比较后腿杆各部位自由度释放后的内力变化情况。

2.2.1 塔架后面腿杆下部（20 单元）自由度释放见表 3、表 4。

2.2.2 塔架后面腿杆中部（32 单元）自由度释放见表 5、表 6。

表 5 较大值内力计算表

单元号	I 端结点号	$\bar{X}(N)$	$\bar{Y}(N)$	$\bar{Z}(N)$	$M_x(N.m)$	$M_y(N.m)$	$M_z(N.m)$
	J 端结点号						
16	21	6.864E+05	-4.082E+01	3.303E+02	-2.237E+02	-9.610E+02	-7.118E+01
	18	-6.864E+05	4.082E+01	-3.303E+02	2.237E+02	-1.038E+03	-1.759E+02
12	18	6.842E+05	5.825E+01	-2.518E+02	-2.238E+02	1.038E+03	1.1759E+02
	12	-6.842E+05	-5.825E+01	2.518E+02	2.238E+02	4.859E+02	1.767E+02
8	12	6.765E+05	-4.783E+01	1.095E+03	2.568E+02	-5.063E+02	-1.691E+02
	8	-6.765E+05	4.783E+01	-1.095E+03	-2.568E+02	-6.120E+03	-1.204E+02
30	21	5.745E+05	-1.584E+02	8.558E+00	1.459E+01	-5.629E+01	-1.784E+03
	25	-5.745E+05	1.584E+02	-8.558E+00	-1.459E+01	-4.731E+01	-1.334E+02

表 6 较大值位移计算表

结点号	u(m)	v(m)	w(m)
29	7.47490D-03	6.07073D-03	-2.06081D-02
28	-7.22810D-03	4.95629D-04	-1.85247D-02
25	1.80289D-03	3.24366D-03	-1.49730D-02
24	-1.36488D-03	7.41263D-04	-1.43499D-02

2.2.3 塔架后面腿杆上部（40 单元）自由度释放见表 7、表 8。

表 7 较大值内力计算表

单元号	I 端结点号	$\bar{X}(N)$	$\bar{Y}(N)$	$\bar{Z}(N)$	$M_x(N.m)$	$M_y(N.m)$	$M_z(N.m)$
	J 端结点号						
16	21	6.865E+05	-3.947E+01	3.298E+02	-2.250E+02	-9.583E+02	-5.774E+01
	18	-6.865E+05	3.947E+01	-3.298E+02	2.250E+02	-1.038E+03	-1.811E+02
12	18	6.844E+05	5.964E+01	-2.517E+02	2.251E+02	-1.037E+03	-1.812E+02
	12	-6.844E+05	-5.964E+01	2.517E+02	-2.251E+02	4.857E+02	-5.048E+01
8	12	6.766E+05	-4.844E+01	1.095E+03	2.562E+02	-5.065E+02	-1.739E+02
	8	-6.766E+05	4.844E+01	-1.095E+03	-2.562E+02	-6.121E+03	-1.193E+02
30	21	5.745E+05	-1.577E+02	5.040E+00	1.219E+01	-4.999E+01	-1.782E+03
	25	-5.745E+05	1.577E+02	-5.040E+00	-1.219E+01	-1.102E+01	-1.269E+02

表 8 较大值位移计算表

终点号	u(m)	v(m)	w(m)
29	7.46227D-03	6.09510D-03	-2.06075D-02
28	-7.21556D-03	5.19148D-04	-1.85199D-02
25	1.81030D-03	3.25546D-03	-1.49737D-02
24	-1.37245D-03	7.44386D-04	-1.43505D-02

塔架正面腿杆下部自由度释放后结构位移变位图如图 4 所示。

比较表 3、表 5、表 7 可以看出，后腿杆下部转动自由度释放后对结构有所影响，但影响不太大。相应的最大内力发生在 16 单元（前腿中部），最大轴向内力 $6.88 \times 10^5 N$ 与完好情况下的最大内力值基本相等。但是，从整体上看，由于大腿失去抗弯能力，以致使塔架其余各杆的内力值均增加了 10% 左右。亦即，在静力状况下，塔架局部杆件刚度的退化，不引起结构最大内力的大幅度变化，只引起结构内部各个杆件之间的内力重分布。值得指出的是，上述结论是在塔架仅承受竖向荷载作用下得到的，若塔架在承受竖向工作荷载时，还同时承受横向荷载（例如风荷载等），塔架刚度退化对整体结构受力会有很大影响，这部分工作有

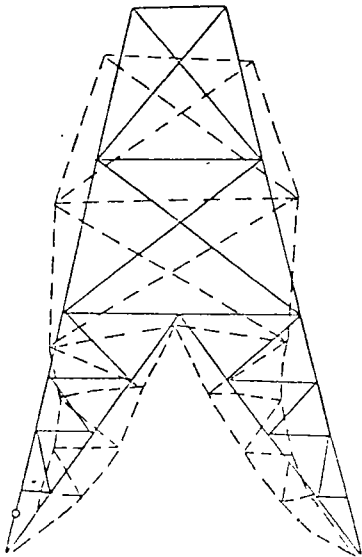


图 4 自由度释放位移示意图

待今后继续完成。

3 结束语

通过以上分析论述和工程实例计算, 本文得出以下结论

- 3.1 对于金属钻井塔架结构, 化简为大腿连续的整体空间刚桁架结构模型, 该模型可以很好地反映塔架力学特性, 按照有限单元法的离散方法, 可以方便和较精确地进行钻井塔架的静态数值分析计算。
- 3.2 在塔架承受静态竖向工作荷载作用下, 塔架正面腿杆中部内力及变位较大, 是承载不利部位, 应对其进行定期强度测试。
- 3.3 塔架局部杆件发生损伤后, 在竖向工作荷载作用下, 对塔架的静态承载能力有一定影响, 造成塔架结构内部各个杆件之间的内力重分布, 所以应经常对塔架结构进行完好性检测。

参 考 文 献

- 1 普齐米尼斯基J.S.著, 王德荣等译校.结构矩阵分析理论.国防工业出版社.1975
- 2 龙驭球等著.结构力学教程.高等教育出版社.1989
- 3 马成刚.求解大型复杂结构动力问题的Lanczos方法及其在刚架系统力学行为分析中的应用研究.郑州工学院硕士学位论文.1994
- 4 王勖成.邵敏.有限单元法基本原理与数值方法.清华大学出版社.1988
- 5 张汝清.董明编著.结构计算程序设计.重庆出版社.1988

Study on Static Mechanical Ability of the Metal Tower Derrick

Wang Wei Chen Huai Ma Chenggang Yin Zhenya
(Zhengzhou Institute of Technology) (Zhongyuan oilfield)

Abstract: In this paper, taking oilfield metal derrick as engineering actual background, cooperating with actual load-carried and working conditions of being used and re-built oilfield tower derrick, the static mechanical ability of tower derrick and effects on the whole mechanical ability is studied, the results obtained can provide references for designing new type derrick.

Keywords: metal tower derrick, static state, mechanical ability