

压裂泵高压排出管汇振动特性测试研究

刘成啟¹ 刘文靜²

(1 中原石油工程公司井下特种作业公司 河南 濮阳 457001; 2 河南大学历史文化学院 河南 开封 457004)

摘要: 为了避免压裂泵高压排出管汇在工作的时候发生剧烈振动的情况,需要对其进行有限元仿真。通过计算可以发现,高压管汇的固有频率和压裂泵的工作频率是非常接近的,所以会有共振的危险发生。因此,通过计算得到的振型改进其约束方式,经过分析得到改进结果,对高压管汇之后的约束方式进行分析,表明固有频率要比压裂泵的工作频率要大得多,对压裂泵工作频率的范围有效避开。而计算结果需要通过分析高压管汇的试验模态进行验证,提供了高压管汇应用以及预防振动的数据支持。

关键词: 有限元仿真; 试验模态分析; 振型; 高压管汇; 压裂泵

1 高压管汇的计算模态分析

1.1 计算模态分析理论

通过结构固有的动力学属性来对结构进行描述的过程就是模态分析。而模态分析的计算一般用矩形式表示描述的系统运动方程组。

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = f(t) \quad (1)$$

在公式(1)中, M表示质量矩阵, C表示阻尼矩阵, K表示刚度矩阵。而对于多自由系统没有阻尼并且没有外界刺激得到的振动方程公式为:

$$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = 0 \quad (2)$$

对线形系统,自由振动为简谐运动,求解出:

$$K\varphi_i = \omega_i^2 M\varphi_i \quad (3)$$

在公式(3)中, φ_i 表示第 i 阶频率的振型, ω_i 而表示第 i 阶模态的固有频率。

1.2 模型的建立

对于模型在建立的时候,可以刚性连接螺栓,并把一些不必要的特征去除。管汇所用的材料是 45CrNiMoV,采用聚碳酸酯作为支撑件的材料。采用四面体网格作为有限元的网格划分,大小为 20 毫米。

1.3 高压管汇的模态分析

施加在高压排出管汇的约束如图 1 所示,固定约束施加在图中 1 与 9 处以及 2 和 7 的底面。这种安装方式分析的模态结果如表 1 所示。

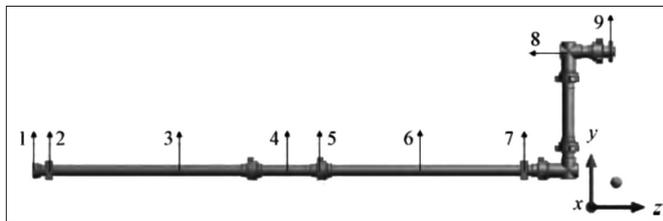


图 1 高压管汇模型

在压裂泵中最主要的激励源就是柱塞与曲轴,其中柱塞频率在 0-15.79Hz 之间,曲轴频率在 0-3.16Hz 之间。并且减速器、电机等设备也会激励高压管汇,但并不能在高压管汇中直接作用,所以影响不是太大。通过上述表 1 可以看出,高压管汇在这种安装方式中前两阶频率在 20Hz 左右,非常

表 1 高压管汇的模态参数

阶数	频率	描述主要的振型
1	19.90Hz	水平段前后弯曲
2	20.12Hz	水平段上下弯曲
3	59.51Hz	水平段前后弯曲
4	59.73Hz	水平段上下弯曲
5	112.51Hz	整体前后弯曲
6	115.79Hz	水平段上下弯曲以及竖直段左右弯曲

接近柱塞频率最大值。据相关的资料表明,要想避免共振必须要让结构件的固有频率和激励频率相隔百分之三十以上才能够有效的避免,所以这种安装方式对于高压管汇来讲,很容易有剧烈振动的情况出现。而高压管汇主要是在水平段出现振动,其各个管汇中间部位振动幅度是最大的。

1.4 对高压管汇的安装进行改进之后的模态分析

通过对上述的安装方式进行分析可以发现,前两阶的频率比较低,与外界容易发生共振,所以对于高压管汇的安装方式必须要进行改进。在图 1 中的 3 处, 4 处以及 6 处的振动幅度比较大,所以要对其进行固定约束。结果如表 2 所示。

通过上述表 2 可以看出,对高压管汇的安装方式进行改进之后,固有频率有很大程度的提升,一阶的固有频率远远大于柱塞最大往复频率,从而能够对共振有效的进行避免。而高压管汇安装改进之后,主要是弯曲振动,前两阶主要发生在竖直段,后四阶在水平段都有振动发生,而在第六阶水平段主要是轴向变形。

高压管汇改进前后进行对比,可以明显看出,改进后

表 2 对高压管汇安装方式改进后的模态参数

阶数	频率	描述主要的振型
1	83.12Hz	部分水平段以及垂直段前后弯曲
2	126.45Hz	部分水平段上下弯曲以及垂直段左右弯曲
3	150.61Hz	整体前后弯曲
4	247.79Hz	水平段上下弯曲以及竖直段左右弯曲与轴向变形
5	270.39Hz	水平段上下弯曲
6	344.41Hz	水平段轴向变形以及竖直段左右弯曲

每阶频率最少提升两倍,从而能够对压裂泵的工作频率进行远离。

2 高压管汇的试验模态分析

2.1 试验模态分析理论

在对试验模态的频响函数进行计算时,需要对输入与输入数据进行采集,而频响函数的公式如下:

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^m \left[\frac{A_k}{j\omega - P_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - P_k^*} \right] \quad (4)$$

在公式(4)中,复数的共轭用*表示,极点用Pk表示,就是复特征值,包含的有阻尼信息以及系统频率。Ak对应与极点Pk的留数和模态振型直接相关。所以,通过频响函数的公式就能够得到全部的模态信息。

2.2 高压管汇的模态试验

通过对模态分析的计算可以得出,对高压管汇的安装进行改进之后,其固有频率远远大于激励频率,所以只需要对改进后的有限元仿真准确性进行验证。对高压管汇振动信号通过锤击法的方式进行采集,经过处理对模态参数进行计算。得到的模态水平段有轴向变形,在实际当中,因为安装传感器的位置限制,对水平段的轴向不能密集布点,所以选择法向方向。

在对可疑极点拟合计算选择时,必须要检验模态置信准则。而本次试验得到的置信准则在0-1之间,如果在置信准则中,非对角线在0.7以上,那么2阶相关性比较大,可能有系统未知分支结构以及虚假模态存在。而本次试验的模态参数其可靠性是比较高的。

通过对高压管汇前6阶参数拟合计算并检验得出,1阶频率为74.89Hz,阻尼为1.90%,主要在管汇整体前后弯曲;2阶频率为113.31Hz,阻尼为1.90%,主要在管汇部分水平段上下弯曲以及竖直段左右弯曲;3阶频率为138.11Hz,阻尼为3.71%,主要在管汇整体前后弯曲;4阶频率为213.79Hz,阻尼为3.81%,主要在管汇水平段上下弯曲以及竖直段左右弯曲;5阶频率为250.61Hz,阻尼为1.90%,主要在管汇水平段弯曲;6阶频率为312.52Hz,阻尼为1.90%,主要在管汇水平段前后弯曲以及竖直段左右弯曲。

通过高压管汇仿真分析结果与试验模态分析结果之间进行对比,可以看出,在试验模态结果中,在竖直段各阶都有振动,而在前两阶中,水平段都有振动,而仿真结果中只有部分水平段振动。而出现这种情况是因为在实际安装高压管汇时,支撑件不能完全的刚性连接高压管汇以及误差,从而在水平段依然有振动存在。但通过对高压管汇竖直段的振型进行分析对比,可以发现,有限元仿真与试验模态分析相对应。所以,对竖直段的振型通过对比可以找到和仿真对应的模态参数。对比仿真与试验结果如表3所示。

通过上述结果可以看出,高压管汇安装方式改进之后,

表3 对比仿真与试验结果固有频率

阶数	计算值	试验值	误差
1	83.12Hz	74.89Hz	9.90%
2	126.45Hz	113.31Hz	10.39%
3	150.61Hz	138.11Hz	8.30%
4	247.79Hz	213.79Hz	13.72%
5	270.39Hz	250.61Hz	7.32%
6	344.41Hz	312.52Hz	9.26%

试验模态参数与有限元结果基本一致,误差均在百分之十五以下,由此说明模态试验是成功的,同时也对有限元的准确性进行了验证。

3 结语

(1)对高压管汇的模态参数通过有限元仿真得到的两种安装方式,在改进前,其高压管汇的固有频率比较低,前两阶都只有20Hz左右的频率,与柱塞的往复频率最大值非常接近,所以很容易有共振的现象出现。而改进之后,支撑件使用更多,管汇的固有频率提高很多,从而与压裂泵的工作频率进行了远离。

(2)根据有限元仿真的振型来选择测点,这样得到的结果会比较好,能够对测试的重复次数进行降低,从而有效的减少了工作量。对比仿真与试验时,根据实际情况,主要对比的是管汇竖直段的振型,能够在试验模态中有效快速的找到对应的仿真模态参数。

(3)通过对高压管汇的安装方式进行改进之后,试验模态参数结果基本与仿真一致,误差不超过百分之十五,由此可以看出,该模态的准确性是比较高的,从而也对仿真的准确性进行了验证。

参考文献:

- [1]王振春,杨德功,张玉燕.液压伺服预紧的电磁发射轨道振动频率和幅值特性研究[J].兵工学报,2019,40(01):32-37.
- [2]任向海,彭振华,张园,等.水力旋流器模态测试与振动特性分析[J].噪声与振动控制,2019,39(02):222-225.
- [3]宋晓童,甘嘉田,赵文强,等.某区域高压并联电抗器振动测试分析及优化[J].电力与能源,2019,40(02):20-23.
- [4]罗亮,张为民,Jürgen Fleischer.进给系统振动特性研究及新型加减速控制策略[J].振动测试与诊断,2019,39(01):166-173+234.
- [5]徐行军,卓维松.预应力混凝土连续梁桥振动测试与动力特性分析[J].成都电子机械高等专科学校学报,2019,022(001):28-31+44.
- [6]鞠佳昌,杨伟松,许卫晓,张立伟.某火力发电厂输煤结构系统振动特性及控制措施研究[J].结构工程师,2020,36(05):78-84.