

天然气压缩机站场工艺管道振动分析技术研究

王 帅 王希贤 (新地能源装备集成产品设计中心, 河北 廊坊 065000)

摘 要: 在天然气行业的不断发展中, 天然气运输也越来越受到重视, 大型的压缩机组开始广泛的运用在天然气长管道运输中, 那么就需要对管道振动分析技术进行优化, 保证天然气运输更加安全。文章主要基于天然气压缩机站场的管路系统及管道振动情况, 对管道振动分析技术进行完善, 提出了管道振动分析模型、激发频率、机械固有频率、气柱固有频率, 从而保证天然气管道运输更加安全。

关键词: 天然气; 压缩机站场; 管道振动分析技术

1 天然气压缩机站场的管路系统及管道振动分析

1.1 气流脉动分析

对于天然气压缩机来说, 在运行的过程中会产生不同程度的气流脉动, 主要是在吸气和排气的过程中, 是交替进行的, 而活塞运动又会随着时间而不断的变化, 这就导致管道当中的流体会受到活塞的激发, 进而产生了具有周期性质的气流脉动现象。

压缩机管道出现振动的本源就是因为气流脉动所产生的, 气流脉动所产生的气体是以音速进行传播, 这就会导致管道内的压力、密度都会产生变化。如果想要对管道振动进行控制, 那么就需要对压缩机管道中的压力脉动情况进行控制, 使其处在允许的范围内进行活动, 使得管道振动充分的解决。需要先建立气流脉动的分析模型, 并对压缩机管道中的气流脉动情况进行分析和预测, 使得对管道结构的相关参数可以更加合理的设计, 保证气流脉动不会影响到天然气管道运输^[1]。

当天然气压缩机管路进行工作的时候, 天然气的气体是需要先从分离器进入, 然后经过了进气总管, 最终进入了两台压缩机中的进气分支管道, 并且经由管道自身的进气缓冲器, 对气体进行缓冲, 气体缓冲之后就会进入到压缩机的双作用气缸中。

在对气流脉动进行模拟的时候, 是需要把管道分为 68 个相对应的节点, 并规定了进气的边界节点, 例如, 可以规定 28 阶就是压缩机闭口的边界, 主要是实现阀门关闭等作用。在整个压缩机运行的过程中, 因为压缩机的进气分离机本身就具有气体缓冲的功能, 所以气体在分离器的上游时, 是不具有压力脉冲幅值的。在对气流脉动进行分析之后, 就能够了解到压缩机中不同节点位置的运行情况, 并且了解了不同转速的气流脉动情况, 当压缩机的转速为每分钟 265-370r 的时候, 那么其压力不均匀程度比较小, 脉动幅

值较低, 进而就不会产生管道振动的现象。

1.2 管道振动分析

对于压缩机站场来说, 其是天然气管道长距离运输的主要部分, 其中压缩机的进出口管道和压缩机是直接连接的, 这样的状况就很容易受到振动源的激发, 进而产生了振动。如果一旦激发源自身的振动频率和管道固有的频率是一致的, 那么就会产生共振现象, 这会对天然气管道产生破坏, 从而引发了安全事故。而且天然气压缩机站场工艺管道自身所填充的气体也有自己固有的频率, 一旦激发频率和这一固有的频率相类似, 那么就会导致气柱系统出现了响应, 进而引发公正, 对管道造成了严重的破坏。

在对管道振动情况进行分析之后, 就需要找到共振容易发生的频率范围, 这就会对压缩机站场工艺管道振动分析提供实际的支撑, 可以对管道运营的状况进行维护。对于天然气压缩机站场工艺管道振动来说, 其主要是分为两个部分, 分别是机械振动和气柱振动。其中机械振动主要是由管道、附件、容器所构成, 在受到激发之后就会产生机械振动的响应。尤其是当管道内的气柱或者是压缩机的激发频率已经超过了固有频率的 0.8-1.2 倍, 那么就会产生交互振动的现象, 这种振动会给天然气管道造成比较大的损坏。气柱振动则是指在管路内的气体, 是有自己固有的频率的, 当激发源振动频率和固有频率相类似, 那么就会产生气柱振动^[2]。气柱共振的时候, 就会产生比较强烈的共振现象, 而且气流的脉动压力也比较大, 这就导致管道内的气体会产生共振, 使管路产生不平衡现象, 不利于天然气的稳定传输。

2 天然气压缩机站场工艺管道振动分析技术

2.1 管道振动分析模型

天然气压缩机站场工艺管道系统主要是一种连续的具有弹性结构的系统, 其在激发频率下, 就会产生

一定的机械或者是气柱振动。所以在设计相关管道的时候,除了要对管道内流体的气柱所存在的固有频率进行计算以外,还要对管道结构的固有频率和机械振动进行机械,这样才能充分的了解到管道振动的情况,进而对其进行分析,尽量保证压缩机管道在工作过程中是安全的。

在对压缩机站场管道振动进行分析的时候,需要建立分析模型,然后进行激发响应分析,从而了解气流脉动在激发力的作用下,管道振动产生的情况。对于管道振动分析模型来,主要是采用三台压缩机作为刚体处理,阀门则是刚性单元处理,而管卡以及支撑的位置则是要放置在进气、闭口等约束边界中。

进行分析之后,其模态具体的分析结果是,当压缩机转速的范围控制在每分钟 265-440r 的时候,激发力的基本频率就是 4.4-7.3Hz,由于天然气压缩机站场工艺管道是双作用力,所以其主频率就是 8.8-14.6Hz。可以采用 CAESARII 对模型进行模态分析,经过计算,此管道的前 10 阶的固有频率为 2.6-15.7Hz,而且大部分都是处在主激发频率当中,所以管道很容易会产生共振现象。

在压缩机不同环节中其固有频率也是不同的,其中管道前 5 阶的振动都会发生在分离器出口的转弯位置,会对天然气管道产生一定的振动现象。在利用 CAESARII 对模型进行分析之后,也就得到了在不同激发频率下,所产生的振动位移现象,例如,在每分钟 385r 频率运行的时候,那么最大的振幅数值就是 0.393mm,振动的位置主要是在分离器出口位置,当了解了振动位移,就可以采用管道振动分析方法,对其进行调整,降低压缩机管道振动情况^[3]。在对天然气压缩机站场工艺管道振动情况进行分析之后,就可以对管道进行改造或者是优化,减少管道振动的情况,保证压缩机管道振动是在规定的范围内。在对站场管道进行设计的时候,由于受到了地形和管道布局的影响,所以需要抬升管道的高度,主要抬升 500mm,在升高管道之后,就会使原有的管道增加 2 个 45 度的弯头,使得管道布局发生了变化,最终形成了涡流,这样在管道内部就会产生相应的气流脉动。通过软件模拟可以发现气流脉动的主频率是 385Hz,管道激发频率为 382Hz,这就会产生交互振动的现象,也就会形成机械振动,那么就需要在管道阀门的位置增加一些孔板,这样就能让管道的运行更加平稳,减少振动现象。

2.2 激发频率

在进行管道振动分析的时候,就会使用专业的软件,也就是 CAESARII,利用这一软件建立管道模型,并且根据不同天然气压缩机站场的实际情况,来设计不同的约束力,并且在软件的动态分析模块中,计算出固有频率和激发频率。为了能够保证频率计算更加准确,就可以利用频响函数的方法,这一方法在使用的过程中能够避免在计算中对气柱不同阶次固有频率的遗漏,使得计算更加全面,并且利用 MATLAB 程序,来对计算出的固有频率和激发频率进行比较,从而分析出引起管道振动的主要原因,并对这一问题进行处理,降低管道振动的现象。其中激发频率的计算就是采用以下公式。

$$f = \frac{mn}{60}$$

在上述的公式中, f 主要指的是压缩机的激发频率, m 是气缸作用方式中的一个数字,当气缸是单作用的时候,那么 m 就是 1,如果气缸是双作用,那么 m 就是 2, n 则是指压缩机举起的转速情况。根据这一公式,就能了解到目前压缩机站场工艺管道自身的激发频率时 382Hz。在对激发频率进行计算和分析之后,就要结合现在管线的布置,对管路系统进行调整,需要在进气管和分支管道之间增加一个直径为 610mm 的汇管,这一汇管主要是起到气流缓冲的作用,可以减少管道内部出现的气流脉动,并且减少了动应力。同时也要调整与汇管连接的分支管道的高速,使其高度降低到 0.6m,这样就能增强了天然气压缩机管道的稳定性,保证其在不同激发频率下,振动位移得到了有效的改善,管路中大部分的节点振幅都控制在 0.1mm 以下,改善了管道振动现象,使天然气压缩机管道运行更加稳定安全。

2.3 机械固有频率

在软件 CAESARII 中建立相应的模型,就可以根据管道的实际情况来设置针对性的约束条件。对于正常的天然气压缩机站场来说,其进出关的管道之间是有一条旁通进行连接的,所以在对其机械固有频率进行分析的时候,就需要先建立压缩机进出口管道的模型。

然后利用软件当中的动态模块,计算出管道各阶所固有的频率,例如,64 阶的频率就是 326.9Hz,65 阶的频率为 336.8Hz,66 阶的频率为 341.3Hz,67 阶

频率为 344.2Hz, 68 阶的频率为 387Hz 等。在计算出不同阶次的频率之后, 由于管道激发频率是 382Hz, 所以激振频率就在 67 和 68 阶之间。

在确定了激振频率之后, 就要通过 CAESARII 的仿真功能, 来判断出管道共振所产生的位置, 共振形式主要分布在压缩机出口的直管位置、进口部分到管段的拉伸位置, 并且要把连接进出管线的旁通管设置在阀门附近, 这样就能保证机械共振现象减少。如果管道共振出现在上述的区域内, 那么就会给管道带来极大的破坏。为了能够减少振动减少, 那么就可以采取减少弯管的数量, 并且适当的增加支撑数, 使得跨度得以减少, 提升了管道系统的刚度。在增加支点的时候, 主要可以采用管卡的方法, 要先把管道固定在一个支架上, 利用管卡对其进行固定, 然后在管卡和管道中间增加橡胶板, 这样就能为管道增加一定的阻尼, 使得管道振动减少, 同时也能保证管线的温差可以轴向伸缩, 保证天然气压缩机站场工艺管道振动现象降低^[4]。

2.4 气柱固有频率

对压缩机管道系统中的气柱固有频率进行计算的时候, 主要采用的是频响函数的方法, 这一方法可以计算的更全面, 不会出现遗漏现象, 而且计算也更加准确。对于天然气压缩机站场工艺管道系统来说, 其是由管道的直管元件以及集中阻力元件所组成的。在正常情况下, 管道内产生任何波动的情况都要由脉动压力和脉动质量所确定。在简谐波动下, 如果任一个元件中, 进出口两个断点为 i 、 j , 那么其压力和脉动流量的增幅就可以是 P_i 、 P_j 、 ξ_i 、 ξ_j , 这四个进出口的参数关系如下。

$$K_p = \begin{Bmatrix} P_i \\ P_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i^* \\ \xi_j^* \end{Bmatrix}$$

在上述公式中, K_p 主要是直管的单元刚度阵, 其中集中阻力原件自身的刚度阵则如下公式。

$$K_p = \frac{S}{R_c} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

通过分析了单元刚度阵和集中阻力原件刚度阵, 就可以形成整个系统的总刚度阵, 并且在对相应的边界结点进行处理之后, 就可以得到结点压力和外界流入管道内气体的质量和流量, 从而分析出了脉动质量和脉动的压力。在对气柱固有频率进行计算的时候,

就要利用刚度阵, 刚度阵也是圆频率 ω 的函数, 只有通过 ω 的反复赋值, 才能找到符合管道实际条件的 ω 数值, 这些数值也就是气柱固有的频率, 然后就可以利用频响函数的方法, 对其频率进行计算, 得出在压缩机站场工艺管道中各个阶次的气柱固有频率。例如, 11 阶次的固有频率为 286.6Hz, 12 阶次的固有频率为 304.5Hz, 13 阶次的固有频率为 340.4Hz, 14Hz 的固有频率为 376.2Hz, 15 阶次的固有频率为 394.1Hz。其中, 需要注意的是激振频率是 382Hz, 所以其是在 14 和 15 阶次之间, 所发生气柱共振的频率是比较低的。但是如果考虑到刚度矩阵所受到温度的影响, 在温度变化的时候, 气柱的固有频率就会与激振频率比较接近, 就会出现振动破坏的现象。为了能够更好的解决这一问题, 那么就需要对管道进行改造, 例如, 可以在出现破坏区域的附近调整弯头, 使其控制在 45 度, 这样就能减少激振力对其的影响, 使管道振动分析更高效。

3 结论

综上所述, 对天然气压缩机站场工艺管道振动分析技术进行研究, 可以减少天然气管道振动事故的发生几率, 保证天然气在生产、储存、运输过程中更加安全。

在优化管道振动分析技术的时候, 主要是从分析模型、激发频率、机械、气柱频率入手, 使得管道振动分析更加完善, 保证压缩机站场对管道振动进行了控制, 提升天然气管道的运行效率。

参考文献:

- [1] 张俊, 兰宇剑. 天然气长输管道站场压缩机厂房的设置 [J]. 化学工程与装备, 2023(01):92-95.
- [2] 吴二亮, 杨叶, 李宇雷. 离心式天然气压缩机串联运行节能策略研究 [J]. 石油和化工设备, 2022, 25(12): 139-143.
- [3] 徐威. LOPA 分析在天然气压缩机站场项目风险管控中的应用 [J]. 项目管理技术, 2022, 20(06):128-132.
- [4] 郭婧. 长输天然气管道压缩机站、气体冷却站、配气站工艺设计翻译实践报告 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2020.

作者简介:

王帅 (1993-), 男, 汉族, 河北廊坊人, 本科, 主要从事: 天然气及工艺气增压往复压缩机设计、制冷剂增压螺杆压缩机设计。