

基于有限元方法的管道流致振动计算及验证

苗碧琪, 蒋庆磊, 李元姣, 包彬彬

(中核武汉核电运行技术股份有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要 : 基于有限元方法对管道流致振动进行了仿真计算, 首先通过计算模态和实测模态的对比, 不断调整管道模型约束条件, 使之能和现场情况一致。最后通过 Ansys 瞬态动力学计算功能求解管道模型在瞬态力作用下的响应, 得到计算时域波形和计算频谱, 将之分别与实测时域波形和实测频谱对比, 从对比结果可以看出, 时域上计算和实测振动幅值在同一个数量级, 且趋势一致, 频域上计算和实测频谱结构相似。结果表明, 该计算方法合理, 对管道流致振动治理具有重要的工程意义。

关键词 : 有限元、约束条件、流致振动、模态、瞬态动力学

中图法分类号 TK37; 文献标志码 A

Calculation & Verification of Pipeline's Flow Induced Vibration based on FEM

MIAO Bi-qi¹, JIANG Qing-lei¹, Li Yuan-jiao¹, Bao Bin-bin¹

(1.China Nuclear Power Operation Technology Corporation,Wuhan 430223, China)

[Abstract] Based on the FEM, the flow induced vibration of the pipeline is simulated. First, by comparing the calculated mode with the measured one, the constraint conditions of the pipeline calculated model are adjusted to make it consistent with the measured one. Finally, the Ansys transient dynamics calculation method is used. Compared with the measured waveform and measured spectrum respectively, it can be seen that, the calculated and measured vibration amplitudes in the time domain are on the same order of magnitude, and the trends are the same. Also, the calculated and measured spectral structures in the frequency domain are similar. In a word, the calculation method is reasonable, and it can be used for solving the problem from the flow induced vibration of pipeline.

[Keywords] FEM; Constraints; Flow-induced vibration; Modal; Transient dynamics

管道流致振动一直以来都是困扰电厂生产的难题，同时也是工程改造的重点关注对象，然而由于其本身影响因素众多，加上现场情况的复杂性，导致处理措施往往难以制定。

针对管道振动的治理措施，目前主要是从降低激励和增加管道刚度两个角度来解决。从降低激励的角度考虑，需要对激励源，即阀门等节流件的缩颈部分等阻力件进行改造，降低激励的大小。从增加管道刚度的角度考虑，需要通过改变或增加支撑等外部手段减小振动激励对管道的影响。而上述工作，都需要我们对流动状态及激励产生的原因有深入的研究，同时有可靠手段对不同激励源所产生的激励及振动变化情况进行预测和分析。

为了验证如何应用瞬态动力学方法对管道流致振动进行仿真模拟，本文将首先根据模态计算和实验测量的结果对比，调整有限元模型，最后通过瞬态动力学方法计算管道的流致振动，通过和实测结果的对比，验证其合理性。

1 有限元模型建立及修正

模态分析用于确定结构的固有频率和振型。固有频率和振型是承受动态载荷结构设计中的重要参数。由于固有频率和振型是结构的固有属性，所以可以通过模态分析的结果来验证有限元模型的准确性。理论与实践表明，阻尼对结构的固有频率和振型影响不大。结构的无阻尼自由振动方程为：

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\} \quad (1)$$

式中[M]、[K]：分别为质量矩阵、刚度矩阵，

$\{\ddot{u}\}$ 、 $\{u\}$ ：分别为节点加速度向量、节点位移向量；

对于线性系统，自由振动为简谐形式：

$$\{U\} = \{\phi\}_i \cos \omega_i t \quad (2)$$

式中， $\{\phi\}_i$ 为第*i* ($i=1,2,\dots,n$)阶固有频率对应的特征向量，即振型； ω_i 为第*i*阶固有频率（单位 rad/s）；*t*为时间。

将式（2）带入式（1），有：

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\phi\}_i = \{0\} \quad (3)$$

式（3）有非零解的条件为小括号内的行列式必须为零，即特征方程：

$$|[K] - \omega_i^2 [M]| = 0 \quad (4)$$

由公式（4）即可得特征值 ω_i^2 ，将 ω_i^2 代入公式（3）可求得与之对应的特征向量 $\{\phi\}_i$

1.1 初步有限元模型及其合理性验证

初步有限元模型按真实尺寸 1:1 建立。初步建立的有限元模型如图 2 所示，支撑均采用简支。由于只关心振动加速度响应等参数，所以单元类型采用管单元 PIPE16(直管段)和 PIPE18 (弯管段)-考虑管内满水的质量，同时采用集中质量单元 mass21 模拟孔板和法兰。图 1 为管道实景图，其中红圈中为可拆卸试验件段，试验管件段内置孔板，通过法兰和管道联接。由图可见管道的支撑为带卡箍的简支结构。



图1 试验管道图

Fig.1 Photograph of test pipe

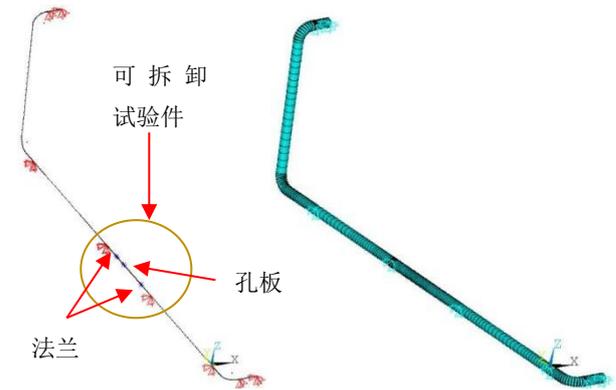


图2 试验管道有限元模型-简支

Fig.2 FEM of test pipe-simply support

通过有限元计算的固有频率与实测固有频率前 3 阶对比如表 1 所示。通过有限元计算与实测的管道前三阶振型对比如图 3 所示。

从振型对比图可知，简支模型计算出的振型和试验测量得出的振型吻合度较好；但从频率对比表来看，简支模型一阶固有频率与实测基本一致，但随着阶数的升高，误差越来越大，这说明现场的支撑状态不完全是简支，模型需要修正。

表 1 有限元计算与测量前 3 阶固有频率对比

Table 1 3-order natural frequency of FEM VS Experiment

阶数	计算频率/Hz	测量频率/Hz	计算-测量 偏差
1	64.691	64.82	0.2%
2	87.06	79.00	9.3%
3	134.79	104.46	22.5%

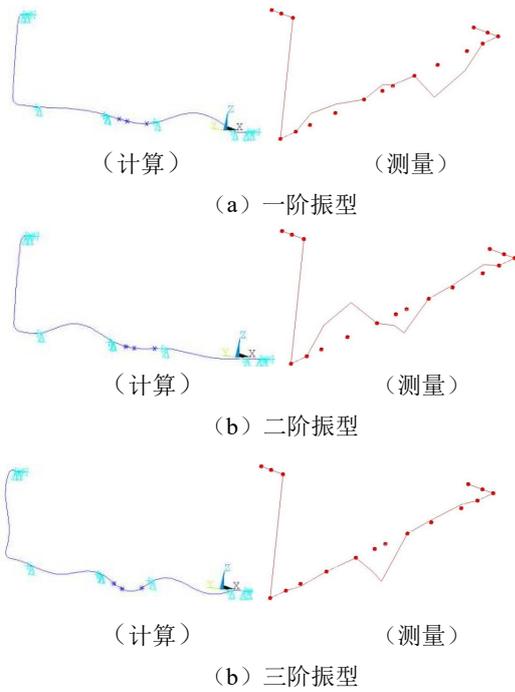


图3 有限元计算与测量前三阶阵型对比

Fig.3 FEM VS Experiment of 3-order vibration mode

1.2 修正有限元模型及其合理性验证

结合表 1 和图 3 可知，模型修正应集中在降低高阶计算固有频率，而高阶模态主要为可拆卸试验管段（见图 1）。

由振动力学可知，固有频率计算公式为：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (5)$$

其中，质量 M 为已知项，影响计算固有频率的因素只有刚度 K ，要想降低固有频率，只有降低刚度 K ，所以考虑将可拆卸管段两头支撑改为弹簧支撑。弹簧单元类型为 COMBIN214，弹簧刚度 $K=1e8$ 如图 4 所示。

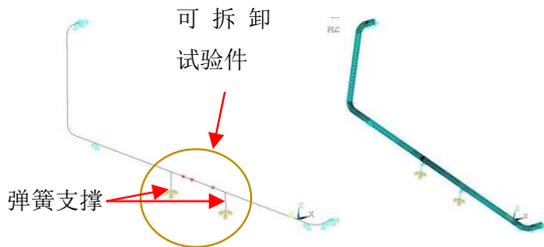


图4 修正后的弹簧支撑有限元模型

Fig.4 Revised FEM -spring support

弹簧支撑计算出的固有频率与实测固有频率前 3 阶对比如表 2 所示。前三阶振型对比如图 5 所示。

从弹簧模型固频与试验测量固频对比表可知，修正后模型的计算固有频率和测量固有频率十分吻合，其中三阶固有频率偏差最大，且仅为 5.50%；同时修正后模型的振型与试验测量的振型吻合度非常好，这说明修正后模型的精度较高，可靠性较

好，可以用于后续的振动计算。

表 2 模型修正后计算与测量前 3 阶固有频率对比
Table 2 3-order natural frequency of Revised FEM VS Experiment

阶数	计算频率/Hz	测量频率/Hz	计算-测量偏差
1	62.84	64.82	-3.05%
2	81.09	79.00	2.60%
3	110.49	104.46	5.50%

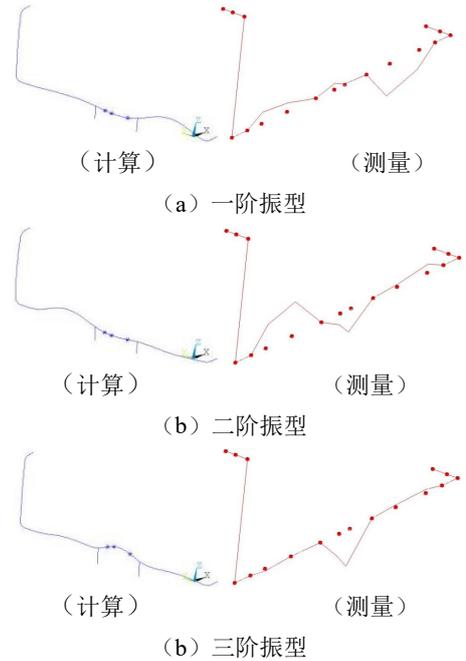


图5 模型修正后计算与测量前三阶阵型对比
Fig.5 3-order vibration mode of Revised FEM VS Experiment

2 管道振动计算

本文将采用瞬态动力的方法进行管道振动计算，通过将计算得到的结果和测量得到的结果进行对比，验证计算方法的合理性。

瞬态动力学分析用于当结构承受随机载荷时，确定其动力学响应的一种方法。可以用瞬态动力学分析确定结构在稳态载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合作用下的随时间变化的位移及其导出变量，如应变、应力、加速度等。

瞬态动力学方程：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (5)$$

式中： $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ ：分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵， $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ ：分别为节点加速度向量、节点速度向量，节点位移向量； $\{P\}$ ：节点激励向量。

现场测量管道振动的方法为采用三向加速度

计获取实时三向加速度值，现场测点布置如图 6 所示。

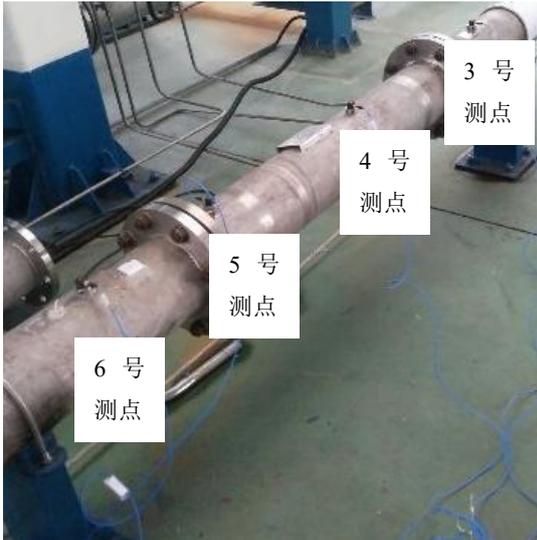


图6 管道振动加速度测点布置

Fig.6 vibration measurement points on the pipeline

由于 Z 向（竖直向）支撑较为可靠，所以取 Z 向测量加速度和 Z 向计算的加速度进行比较。

采用 ansys 进行瞬态动力学计算获得时间历程加速度，加载的瞬态力采用 CFD 计算提取的可拆卸试验管段时间历程压力。由于试验段的瞬态力主要来源于孔板对流道的改变，所以力的作用点选在孔板处-见图 6 测点 5 处或图 7。

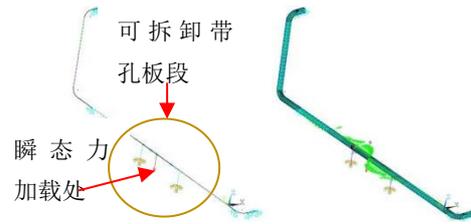


图7 Ansys瞬态力加载及计算弯矩图

Fig.7 transient force loading & Calculation results of bending moment

图 8~15 为 3~6 号测点计算和实测瞬态响应对比图-分别从时域和频域对比:

从结果对比图 8~15 可知:

①从时域对比来看，计算和测量振动幅值在同一个数量级，同时从波形对比细节图来看，趋势一基本致;

②从频谱对比来看，计算和测量的频谱结构相似，只是由于现场噪音等干扰，造成了测量结果底噪较高;

③从计算和试验近似度来看，除 5 号点外，越接近瞬态力加载点，计算和测量结果越接近，这是由于距离激振点（测点 5-孔板所在处）越近，才能最大程度保证其模拟和实际受力情况一致，例如 4 号点较之 3 号点好；测点 5 以后发生了湍流导致了较大的脉冲力，所以 5 号点计算和实测相差大一些，测点 6 也有类似问题，只不过其已经远离了孔板一段距离，没有 5 号点明显。

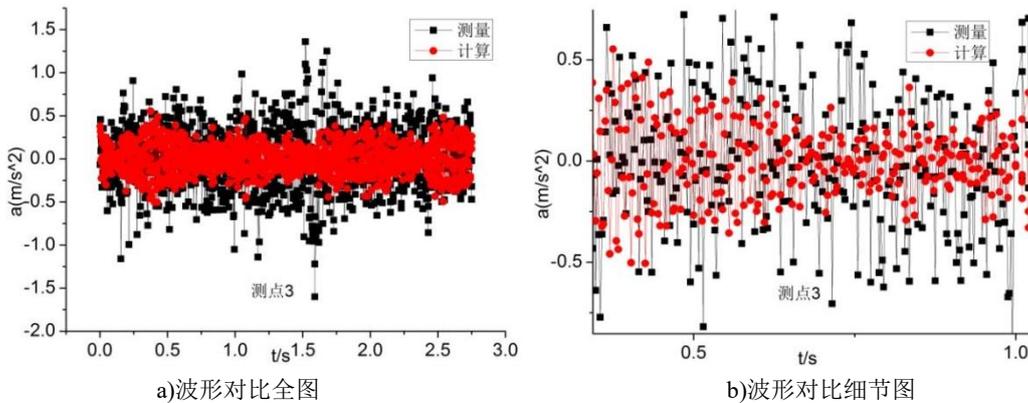
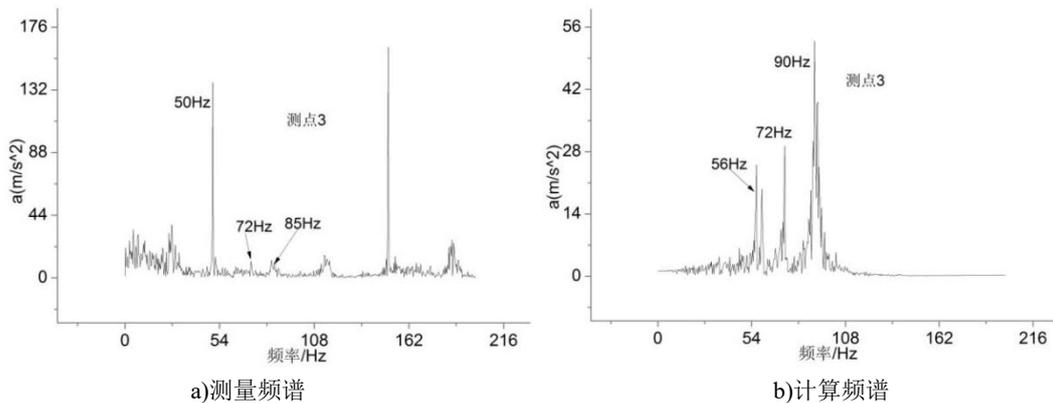


图8 测点3时域波形对比

Fig.8 Time domain waveform comparison of measurement point 3



a)测量频谱

b)计算频谱

图9 测点3频谱对比

Fig.9 Frequency spectrum comparison of measurement point 3

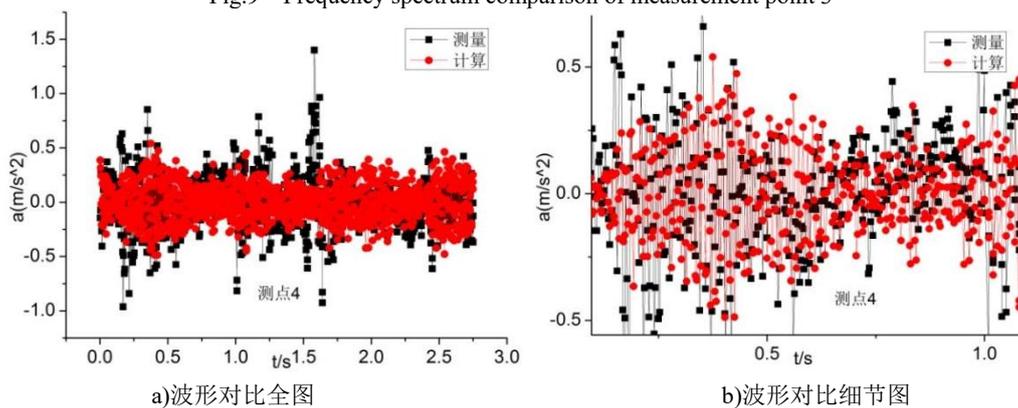


图10 测点4时域波形对比

Fig.10 Time domain waveform comparison of measurement point 4

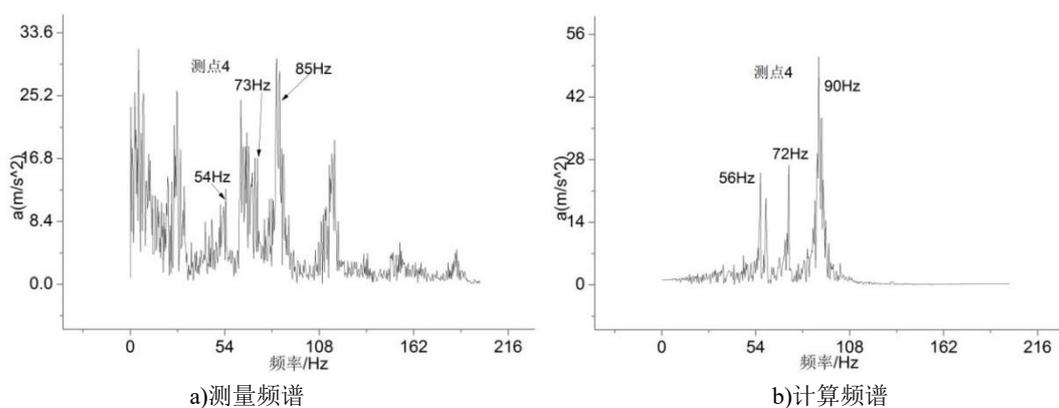


图11 测点4频谱对比

Fig.11 Frequency spectrum comparison of measurement point 4

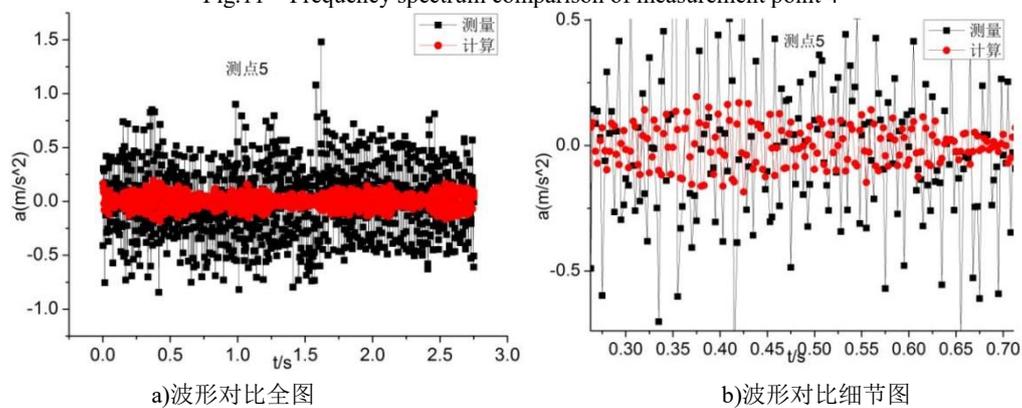
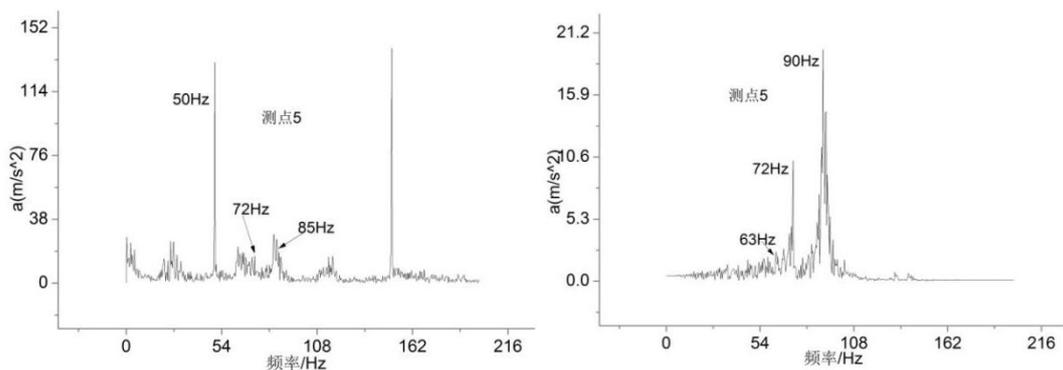


图12 测点5时域波形对比

Fig.12 Time domain waveform comparison of measurement point 5

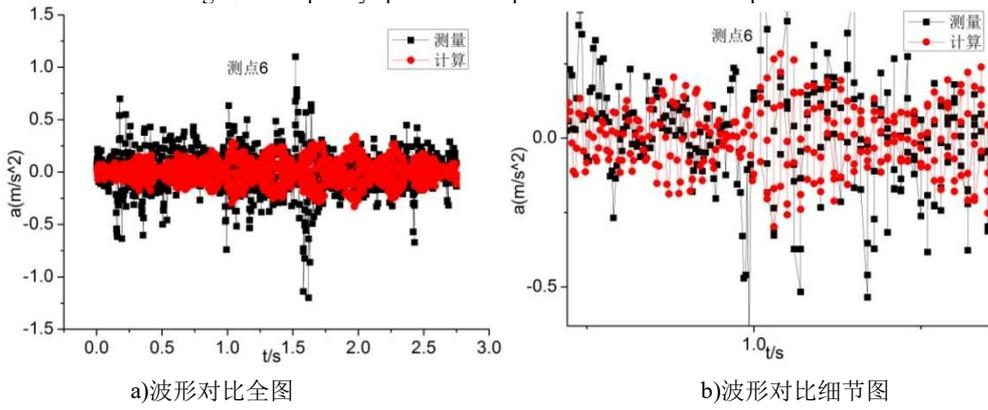


a)测量频谱

b)计算频谱

图13 测点5频谱对比

Fig.13 Frequency spectrum comparison of measurement point 5

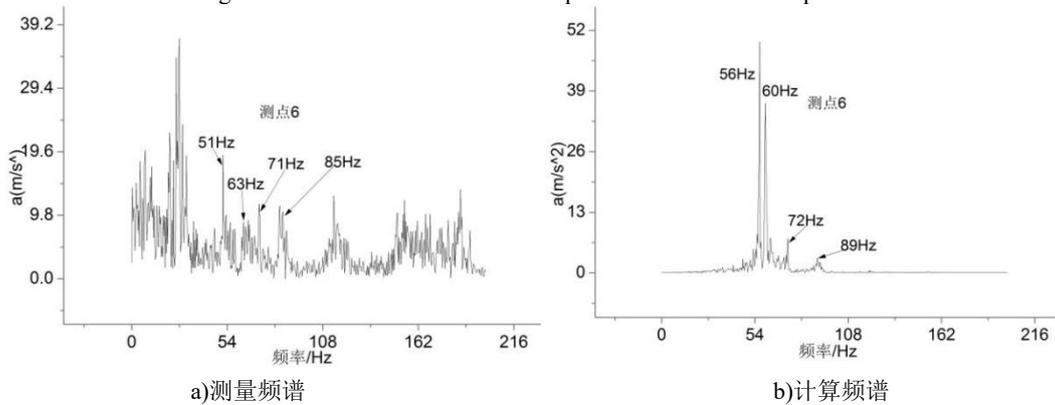


a)波形对比全图

b)波形对比细节图

图14 测点6时域波形对比

Fig.14 Time domain waveform comparison of measurement point 6



a)测量频谱

b)计算频谱

图15 测点6频谱对比

Fig.15 Frequency spectrum comparison of measurement point 6

5 结论

本文基于有限元方法对试验管道进行了仿真计算，得到了以下结论：

- (1) 现场管道支撑情况较复杂，为了有效的进行仿真计算，需不断对模型约束条件进行调整，本文采用的模态对比方法是一种有效的模型约束合理性评价方法；
- (2) 瞬态动力学方法可较为准确的对管道流致振动进行仿真计算，同时该方法可直观的给出时域波形

图和频谱图，这对于工程实践意义重大。

参考文献

- [1] 倪振华.振动力学[M].西安：西安交通大学出版社，1988：161~177
- [2] ANSYS, Inc. ANSYS User's Manual for Revision 8.0.2003：185~200
- [3] 毛庆,姜乃斌.孔板诱发管道流致振动响应的计算方法[J],核动力工程,2009(30):22~26