



【应用技术】

工作模态分析方法的应用研究

朱国良, 王开和, 卢学军, 李树森
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 在供水管道系统中,管道系统的振动是噪声污染的主要原因,有必要对管道系统的动态特性进行深入地研究.本文对管道系统实验模型进行工作模态分析,利用带阻滤波技术对含有谐波的响应信号进行预处理,使信号满足白噪声激励条件,生成 ODS FRF 函数,并拟合得到系统的工作模态参数和振型.与试验模态分析结果相对比,并经实例分析,证实了该工作模态分析理论与方法的可行性,可以为供水系统的减振降噪及改造研究提供可靠的依据.

关键词: 工作振型; 频响函数; 试验模态; 工作模态参数; 识别

中图分类号: TB302.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-6510(2007)01-0075-04

Study on Operational Modal Analysis Method of Pipe System

ZHU Guo-liang, WANG Kai-he, LU Xue-jun, LI Shu-sen

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: The pipe system's vibration is the main reason of noise pollution in the water supply piping system. It is necessary to study thoroughly on the dynamic characteristics of pipe system. Based on the operational modal analysis of the experimental model of pipe system, the responses were preprocessed with the technology of band stop filter to make the signals satisfy with the condition of white noise excitation. The operational modal parameters were obtained and modal shapes were got by curve fitting the ODS FRFs generated. Compared with the results of experimental mode, it proves that the theory and methods of operational modal analysis are practicable. The results provides a reliable foundation for reducing vibration, lowering noise level, and pipe systems rebuilding.

Keywords: operational deflection shape; ODS FRF; experimental mode; operational modal parameter; identification

在供水管道系统动态性能研究方面,通常采用的模态分析方法有有限元理论分析法和试验分析法两类.有限元方法中建立的结构动力学分析模型,由于理论假设(如边界条件、约束条件等)和原始参数的不确定性,不能如实或足够准确地反映结构的实际情况.试验模态分析方法往往是通过测量工程结构在非工作状态下的激振力和响应,进而采用频响函数或脉冲响应函数来识别模态参数.在工程实践中,一些工程结构在工作状态下只受到环境激励,而这些激励源的输入信号是无法得到的.

工作模态分析方法是一种新的模态分析技术,单独利用工作状态或环境激励下的响应信号识别出的工作模态参数符合实际工况及边界条件^[1,2],能真实地

反映结构在工作状态下的动力学特性.本文以一个对环境有严重噪声污染的供水管道系统试验台为研究对象,通过它来模拟高层楼的供水系统,针对以水泵为周期性激振源的情况,对其工作模态参数识别方法进行了深入的探讨.

1 ODS FRF 模态分析方法^[3,4]

1.1 ODS FRF 理论基础

工作振型(Operational Deflection Shape,即 ODS),表现的是在工作状态下的某个特定频率或时刻,结构上两点或多点之间的相对振动,或一个点相对其他所有点的振动状态.

工作振型中包含了结构的动态特性,其测量比模

收稿日期: 2006-05-22; 修回日期: 2006-09-08

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金资助项目(020501)

作者简介: 朱国良(1981—),男,河北沧州人,硕士研究生.

态振型更容易,使结构的动态特性形象、直观地加以显示,通常是通过测量工作振型来获得结构的模态振型.在未知激励的情况下,ODS FRF (工作振型频率响应函数)是分析工作状态下结构振型的理想方法.ODS FRF 是计算工作状态下响应数据间的频率响应函数,把某一点的响应信号作为参考点信号,其他点响应信号为流动响应信号.ODS FRF 计算的是流动响应信号与参考点响应信号之间的互谱,用流动响应自谱幅值的平方根来代替互谱的幅值可以获得正确的幅值,通过计算互谱确保了不同的测量组响应数据之间有正确的相位信息.因此,ODS FRF 是由流动响应信号自谱的幅值和流动响应信号与参考点响应信号互谱的相位构成,用数学方程表示为

$$\begin{aligned} \text{ODS FRF}(\omega) &= \sqrt{G_{xx}(\omega)} \frac{G_{xy}(\omega)}{|G_{xy}(\omega)|} \\ &= |F_x(\omega)| \frac{G_{xy}(\omega)}{|G_{xy}(\omega)|} \\ &= \overline{F_x(\omega)} \end{aligned}$$

式中: $G_{xy}(\omega) = F_x(\omega) F_y^*(\omega)$ 为流动响应信号与参考点响应信号的互谱; $G_{xx}(\omega) = F_x(\omega) F_x^*(\omega)$ 为流动响应信号的自谱.

1.2 ODS FRF 参数识别

如果激励谱在模态存在的频率范围内相对平缓,即近似白噪声激励,那么便可以利用常规的频响函数拟合方法对 ODS FRF 曲线进行拟合而得到模态参数.

频响函数矩阵模型包含频响函数曲线、激励傅氏谱和位移响应傅氏谱.模型中的每个元素都可以表示为

$$F_x(j\omega) = H_{x,f}(j\omega) F_f(j\omega)$$

式中: $F_x(j\omega)$ 为响应信号的傅氏谱; $F_f(j\omega)$ 为激励信号的傅氏谱; $H_{x,f}(j\omega)$ 为激励与响应信号的传递函数.

如果假设激励在模态频率范围内满足白噪声激励条件,则傅氏谱的幅值可以用一常数来代替,即

$$|F_f(j\omega)| = C$$

系统的响应与频响函数成正比关系,即

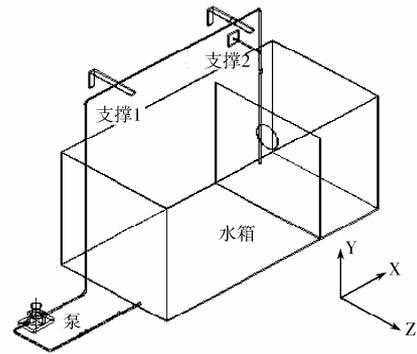
$$F_x(j\omega) \propto CH_{x,f}(j\omega)$$

由上述分析可知,系统的模态频率、模态阻尼和模态振型信息都包含在工作振型频响函数与工作振型之中.ODS FRF 表达式与频响函数形式相类似,因此可以将已经很成熟的频响函数拟合方法稍加改动,就能够用于拟合各响应点信号同参考点信号之间的

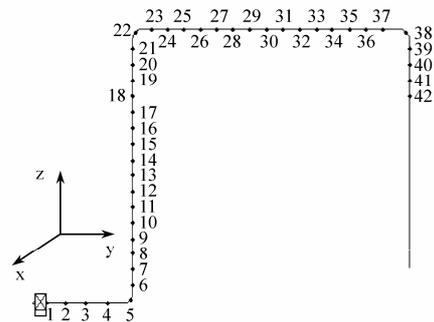
ODS FRF, 从而求出模态参数.

2 管道系统试验模态分析

试验模态分析^[5,6]采用锤击法中单点激励、多点响应的测量方式.实验管道系统与测点布置如图 1 所示.取第 18 点作为敲击点,获得管道系统激励和响应的频响函数,由 ME'scopeVES 模态分析软件通过对频响函数拟合得到系统的试验模态参数.



(a) 管道系统实验模型



(b) 测点布置示意图

图 1 实验管道系统与测点布置示意图

Fig.1 Schematic figure of experimental pipe system and measuring points arrangement

试验模态测试系统包括激励系统、信号拾取元件、数据采集和信号分析系统.测量系统振动信号所用的设备有 8776A50M3 型压电式加速度传感器 (8 个)、9724A2000 型脉冲锤、DEWE - MDAQ - PCI - 16 动态信号分析仪及 16 通道 24 位 ORION 板卡、DeweFRF 动态信号采集软件和 ME'scope VES 模态分析软件.测试系统如图 2 所示.

将测得的响应数据导入 ME'scope VES 模态分析软件中,用峰值函数法计算模态阶数,用正交多项式方法计算模态频率与阻尼.通过对一组频响函数进行曲线拟合得出管道系统在 0~400Hz 范围内的前 9 阶模

态频率、阻尼与振型,并对拟合所得的振型,利用模态置信准则(MAC)来检验两个振型之间的相关性,相关性值大于0.9表示两个振型较相似。

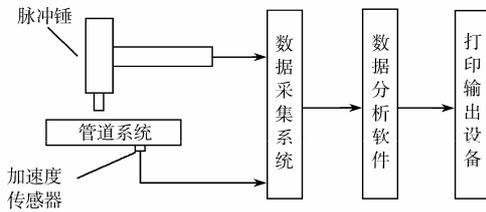


图2 试验模态测试系统框图

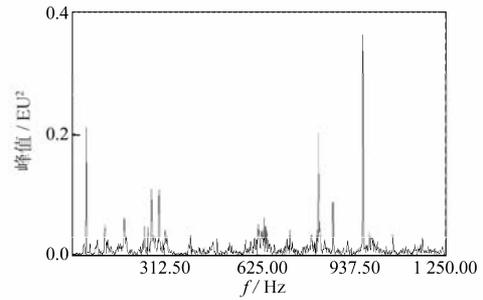
Fig. 2 Figure of experimental mode testing system

3 管道系统工作模态分析

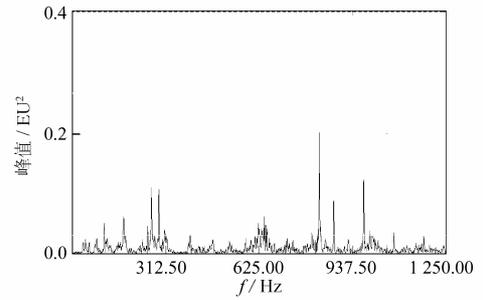
当管道系统工作时,系统的载荷条件就会发生某些变化(例如连接件之间的摩擦与间隙、管内液体流动产生的作用力等),造成整个系统在实际工作状态下的动态特性同非工作状态下的固有特性有很大的不同,必须对整个管道系统进行工作状态下的模态分析,只有这样才能正确地反映实际情况,使分析结果更具有使用价值。

在管道系统正常工作状态下,利用 DeweSoft 软件的实时滤波功能对含有谐波的响应信号进行预处理和采集,并通过 ME' scope VES 模态分析软件对采集到的响应数据进行模态分析,得出管道系统在工作状态下的模态参数.工作状态响应信号测试系统与图 2 试验模态分析测量系统所用设备基本相同,不再使用脉冲锤,且采用 DeweSoft 动态信号采集软件。

在供水系统正常运转的情况下,水泵产生压力脉动,这种周期性激励在管道系统的响应信号中产生谐波响应,为了使用 ODS FRF 方法进行工作状态下的模态分析,需要把谐波响应信号滤掉,以使响应信号近似满足白噪声的激励条件.在水泵正常运转即转速为 2 921 r/min 时,压力脉动的轴频为 48.7 Hz,基频为 243Hz,基频的倍频为 487、730、973 Hz.在采样频率为 2 500 Hz 时需要把上述几个频率成分过滤掉.利用 DeweSoft 动态信号采集系统的数字滤波功能,在通道设置时设置带阻滤波,即可滤掉主要谐波响应成分,其中第 5 点原始信号与滤波后信号频谱图如图 3 所示.可见,由水泵压力脉动产生的谐波响应成分基本被滤掉,滤波后的信号近似满足白噪声激励响应信号条件,其包含管道系统正常工作状态下所有动态响应信息。



(a) 滤波前信号频谱图



(b) 滤波后信号频谱图

图3 第5点原始信号与滤波后信号频谱图

Fig.3 Primary signal diagram and filter signal spectrograph of point 5

测量各测点滤波后的振动响应信号,为了便于将工作模态参数与试验模态参数相比较,取第 18 点响应信号作为参考点响应信号,生成 ODS FRF 函数.采用 Peak 拟合方法对一组 ODS FRF 数据进行拟合,得到管道系统工作模态频率与工作模态振型,并对拟合得到的振型用模态置信因子 MAC 检验两个振型之间的相关性.对工作模态频率与得到的试验模态频率进行比较,如表 1 所示。

表1 工作模态频率与试验模态频率

Tab.1 Frequency of operational mode and experimental mode

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
工作模态频率/Hz	22.5	50.0	86.7	110	169	178	273	315
试验模态频率/Hz	23.7	45.5	94.6	136	169	180	255	337

对试验模态振型与工作模态振型进行比较,其中第 2 阶与第 5 阶振型如图 4 所示,左侧为试验模态振型,右侧为工作模态振型.由表 1 和图 4 可知,管道系统工作模态频率与试验模态频率接近,工作模态振型与试验模态振型基本吻合.对于本实验管道系统,工作状态下系统的频率与非工作状态相比有下降的趋势,此时得到系统的动态特性是管道系统工作状态下的真实动力学行为。

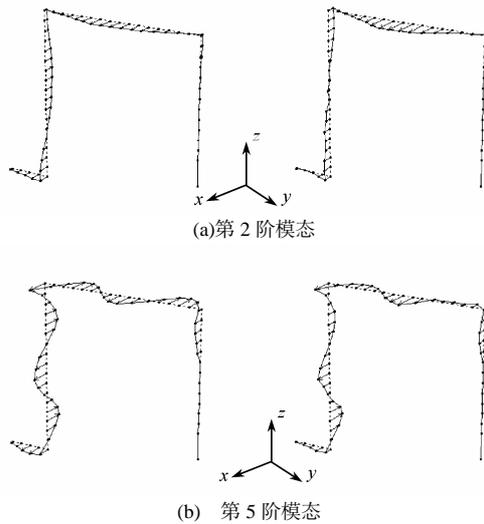


图4 管道系统试验模态振型与工作模态振型

Fig. 4 Experiment modal shape and operational modal shape of pipe system

4 实验

图1(a)所示供水系统实验模型的水泵正常运转时,产生的噪声达79.5 dB,严重污染了实验室的工作环境.水泵压力脉动的轴频、基频及其倍频如表2所示.

表2 水泵压力脉动频率

Tab. 2 Pressure pulsant frequency of water pump

转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	轴频/Hz	基频/Hz	4倍频/Hz
2 921	48.7	243	974

在供水系统正常工作状态下同时对管道振动信号和标准点噪声信号进行采集,通过功率谱分析得出振动信号与噪声信号的主要频率成分基本相同.

对振动信号与噪声信号做相干分析,其主要频率的相干系数都在 0.95 以上,说明供水管道系统的噪声是由振动引起的,确定了本供水系统的振动源和噪声源为水泵的压力脉动.

根据工作模态分析结果,管道系统的固有频率与水泵压力脉动的轴频、基频接近,产生共振,继而引发管道噪声.采取以下措施对管道系统进行改造:选择合理的水泵(如低噪声多级泵),避免水泵的压力脉动频率与管道结构的固有频率接近;结合管道系统的谐

响应分析结果和工作模态振型找到管道结构的薄弱点加以改进,增加其刚度;优化设计缓冲器;避免使用直角弯管和大角度的变截面管;合理选择阀门,选择低噪声的球阀;设计橡胶头、膨胀节等元件来减弱或阻断振动与噪声的传递;对管路的主体部分则采用支撑隔振.

改造后,噪声值下降到 69.1dB,对周围环境的污染得到明显的控制.因此,对该供水系统实验模型的振动与噪声问题所采取的分析方法和改造措施是可行的.

5 结论

在实验管道系统正常工作情况下,可以利用带阻滤波技术对含有谐波的响应信号进行预处理,使信号近似满足白噪声激励条件;由 ME'scope VES 模态分析软件对预处理后的响应数据进行模态分析,得到管道系统的工作模态参数和工作模态振型.与试验模态分析结果相比,并经实例验证,所得到的实验管道系统的动态特性反映了管道系统工作状态下的真实动力学行为.利用带阻滤波技术并结合 ODS FRF 模态识别法进行工作模态分析可为高层楼供水系统减振降噪等进一步研究提供重要的依据.

参 考 文 献:

- [1] 李中付,宋汉文,华宏星,等.一种白噪声环境激励下模态参数辨识方法[J]. 振动工程学报,2002, 15(1): 52—56.
- [2] 郑敏. 单独利用响应数据进行模态分析[J].中国机械工程, 2006,14(4):405—409.
- [3] Brian J Schwarz,Mark H Richardson. Measurements required for displaying operating deflection shapes [J]. IMAC, 2004(1) : 26—29.
- [4] Brian Schwarz,Mark Richardson. Scaling mode shapes obtained from operating data[J]. IMAC,2003(2):3—6.
- [5] 林循泓. 振动模态参数识别及其应用[M]. 南京: 东南大学出版社,1990.
- [6] 曹树谦,张文德,萧龙翔. 振动结构模态分析[M]. 天津: 天津大学出版社,2002.
- [7] 刘进明,应怀樵,沈松. 时域模态分析方法的研究及软件研发[J]. 振动与冲击,2004,23(4):123—126.