

文章编号: 0258-0926(2015)05-0068-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.05.0068

基于功率流的管道系统振动控制及优化设计

张晓玲, 刘天彦, 孙磊, 张鲲, 乔红威, 林松

中国核动力研究设计院, 成都, 610041

摘要: 基于有限元法对管道系统在泵激励下的振动特性进行分析, 以管系传至基础的振动功率流最小为目标, 采用基于 Matlab 开发的优化分析(遗传算法)平台对管道系统支吊架的位置以及刚度进行优化设计, 在保证系统抗冲击能力的前提下, 达到降低管系振动的目的。通过分析得知, 在管道系统的振动控制中, 支吊架位置参数的调整及刚度特性的变化是降低管道振动的有效方法。

关键词: 功率流, 遗传算法, 优化

中图分类号: TK124 文献标志码: A

Vibration Control and Optimum Design of Piping System Based on Power Flow

Zhang Xiaoling, Liu Tianyan, Sun Lei, Zhang Kun, Qiao Hongwei, Lin Song

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: Based on an engineering project, finite element analysis on vibration characteristics of piping system under the excitation of the pump is carried out. Then, by using the genetic algorithm, vibration attenuation is achieved by optimizing the positions of the supports of the piping system with the goal of minimizing the vibration power flow. And antishock performance of piping system must be ensured. The results show that at the aspect of vibration control of piping system, the adjustment of the position of the supports is another effective method for reducing the piping vibration.

Key words: Power flow, Genetic algorithm, Optimization

0 引言

对于管道系统的减振, 目前常用的方法有: 挠性管的接入^[1-3], 即在设备的进出口处增加挠性接管; 管路支吊架弹性安装; 管路的阻尼处理, 可增加阻尼层; 蓄能器的安装, 对流体脉动压力总振级有明显的抑制效果^[3]; 管口消音技术; 负泊松比材料的使用^[4-6]。上述方法对反应堆的管道系统的减振不具有普适性。高温、高压的工作环境, 对系统抗冲击能力的要求, 决定了反应堆管道系统减振降噪工作的高难度。对已有管路系统减振, 在不改变安装条件、不增加

其它设备的情况下要达到一定的减振效果, 对其本身的参数进行优化分析是一种可行的方法。

本文采用有限元法对某实际管道系统在泵的激励下的振动特性进行分析, 得到系统的输出功率流; 并以管系传至基础的振动功率流最小为目标, 采用遗传法优化分析对管道系统支吊架的位置与刚度进行优化设计, 以达到降低管系振动的目的, 保证系统的抗冲击能力满足要求。

1 系统模型描述

本文的分析对象为反应堆一回路系统典型辅助管道系统, 管道规格为 $\Phi 40 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$, 弯曲

收稿日期: 2014-10-21; 修回日期: 2015-01-20

作者简介: 张晓玲(1979—), 女, 副研究员, 现从事反应堆结构力学分析与流致振动试验研究工作

*通讯作者: 刘天彦(1987—), E-mail: rexroi@hotmail.com

半径为 150 mm，管道连接着电动闸阀等相关设备。管道系统振源为 2 个动力泵，通过上、下 2 部分支架固定泵，支架通过减振器固定在刚性界面上。管道通过 4 种共 32 个支吊架结构固定在基础结构上。

分析程序为 ANSYS 有限元程序，管道单元为 PIPE16 和 PIPE18，阀门单元为 VALVE，支吊架采用弹簧单元 COMBIN14 模拟，动力泵考虑中心位置采用 BEAM4 单元模拟，部分附件采用质量单元 MASS21 模拟。分析频段为 10~315 Hz。

2 功率流基本原理及分析

功率是时间的函数，对于振动分析而言，在一定时间内的平均功率比某一时刻的瞬时功率更能反映外部激励注入结构的能量强度。按时间平均的功率称为振动功率流。

对本文的分析对象，系统的输出总功率流包括 2 部分：通过管道的支吊架传至基础的功率流；通过减振器传至基础的功率流。对管道系统在 10~315 Hz 的低频段进行计算，提取各支吊架的功率流 P 在频域内求和，计算得到单位力作用下通过支吊架传递到基础界面的总功率流为 6.11×10^{-7} W，转换成功率级为 57.9 dB。图 1 直观地给出了管道系统各支撑处输出总功率流随频率的变化曲线。

3 优化设计

3.1 优化分析平台

基于 Matlab 遗传算法开发了优化分析平台。

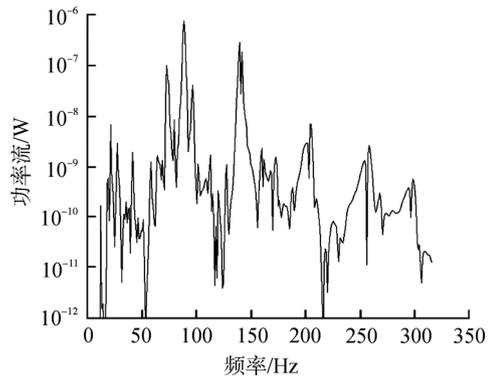


图 1 支吊架输出功率流

Fig. 1 Output Power Flow Curve of the Supports

利用图形用户界面功能编制优化设计平台的界面，并以遗传算法为核心来实现优化设计目的。为了使该平台能与减振降噪分析软件 ANSYS 进行交互式计算，还编制了与 ANSYS 软件进行交互式计算的接口程序，实现了在优化目标函数和约束中利用 ANSYS 软件进行振动噪声指标计算的功能。图 2 为该优化设计平台的算法流程图，首先系统会根据定义的问题、变量以及约束条件随机生成优化变量的初始值，然后调用 ANSYS 程序开始计算、繁殖以及更新修正，直至收敛得到最优解。

3.2 优化参数

优化设计的参数通常包括：优化变量、目标函数以及约束条件。优化变量可以是材料的特性、刚度、阻尼以及位置等；目标函数通常是系统的响应如功率流、振级落差、速度、加速度等；约束条件可定义为设计变量的取值范围，也可以是

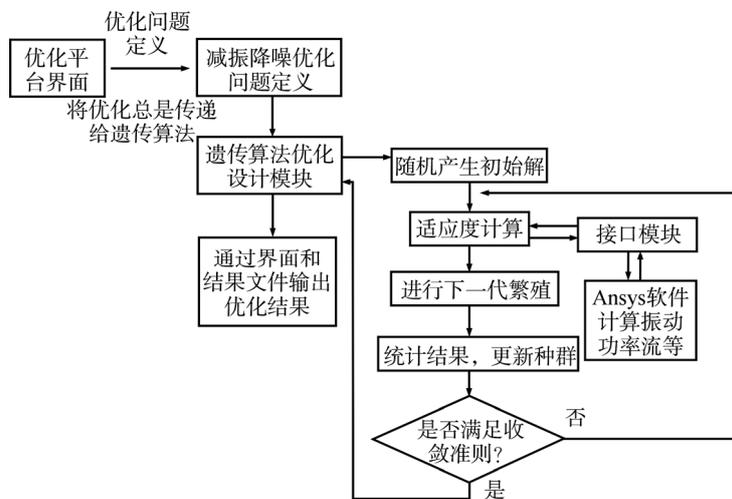


图 2 优化设计平台分析流程图

Fig. 2 Flow Chart of Optimization Design Program

应力、频率等输出响应。隔振系统设计的根本在于降低振动能量向基础的传递，以达到减振降噪的目的。通过对管道系统支吊架位置的调整使传递到基础的振动功率流减小，即以系统的振动功率流为目标函数，以支吊架位置坐标及刚度为优化变量，以管道系统在冲击载荷下的最大位移为约束条件，对系统布置进行优化设计，以降低系统传至基础的振动功率流。

3.3 管系振动的优化设计

根据管道模型的功率流计算结果，综合考虑各支吊架特点，选取4个支吊架重点分析。优化设计中选择支吊架的刚度作为决策变量，位置坐标为优化设计变量，根据功率流的计算公式建立优化分析的目标函数，根据速度 V 与位移 U 的关系 $V=j\omega U$ (ω 为分析频段的角频率) 可将目标函数转换为 ANSYS 中易提取的量^[7]：

$$ga = -\sum_{i=1}^n \int_{\Delta\omega} \frac{\omega}{2} \text{Im}g(F_i U_i^*) d\omega \quad (1)$$

式中， F_i 为通过第 i 个减振器或支吊架传递到系统的激振力， $\text{Im}g$ 表示取其虚部。

在分析中对系统施加冲击载荷，考察管道最大位移，并以此作为优化设计的约束边界，计算中同时输出该位移，以对系统进行抗冲击评价。表1和表2为支吊架位置和刚度变量的初始值以及变化范围，表中支吊架初始位置是相对于沿管道走向距离弯头最近的一端的长度。

表1 管道支吊架位置 m
Table 1 Position of Supports

支吊架	限位支架 1	限位支架 2	管夹 1	限位支架 3
初始位置	0.06	2.203	1.705	0.715
位置上界	0.2	3.53	3.2	1.5
位置下界	0.01	0.05	0.05	0.05

表2 管道支吊架刚度 $N \cdot m^{-1}$
Table 2 Stiffness of Supports

支吊架类型	限位支架	刚性吊架	管夹	弹簧支吊架
刚度	7.0×10^7	61.12×10^6	34.0×10^6	14.69×10^3
刚度上界	1.0×10^8	7.0×10^7	4.0×10^7	2.0×10^4
刚度下界	7.0×10^6	3.0×10^6	1.0×10^6	1.0×10^2

4 优化结果

通过优化设计分析，获得优化后支吊架的位置、刚度与初始值之间的比较结果(表3、表4)。

表3 优化后支吊架位置 m
Table 3 Position of Supports after Optimizing

支吊架类型	限位支架 1	限位支架 2	管夹 1	限位支架 3
初始位置	0.06	2.203	1.705	0.715
优化后位置	0.175	1.828	2.226	0.05

表4 优化后支吊架刚度 $N \cdot m^{-1}$
Table 4 Stiffness of Supports after Optimizing

支吊架类型	限位支架	刚性吊架	管夹	弹簧支吊架
优化前刚度	7.0×10^7	61.12×10^6	34.0×10^6	14.69×10^3
优化后刚度	7.0×10^6	3.0×10^6	1.0×10^6	2.0×10^4

根据优化获得的参数修改原计算模型，计算管道系统在动力泵激励下传递到基础界面的总功率流，得到管道系统通过支吊架输出总功率流减小到 $4.59 \times 10^{-7} W$ ，相较于优化前的结果下降了25%，总功率级也下降到56.6 dB，下降了1.3 dB，优化设计对于振动传递的抑制效果较为明显。

图3更直观地给出了10~315 Hz 频段内目标管道系统各支撑处输出总功率流随频率的变化曲线。可以看到在频域内，管道系统支撑优化后的功率流分布更为分散，峰值也明显小于原始设计方案。

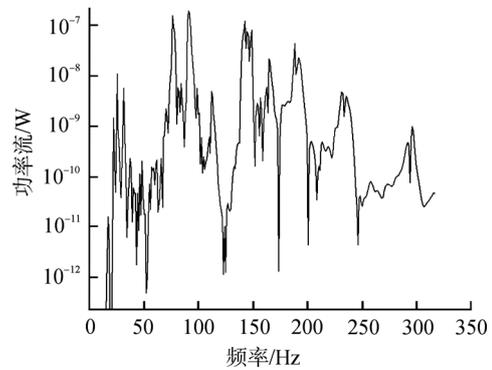


图3 优化后支吊架输出功率流
Fig. 3 Output Power Flow Curve of the Supports after Optimizing

对于上述优化所确定的支吊架的最终位置，对管道系统进行了冲击校核的计算，与初始位置对应比较见表5，可以看出优化后结构抗冲击能力增强。

表5 管道抗冲击计算结果 mm
Table 5 Antishock Analysis Results for Piping System

位移方向		X	Y	Z
管道位移	原始设计	62.2	85.8	49.8
	优化设计	28.7	37.1	25.1

5 结 论

通过基于 Matlab 开发的优化分析（遗传算法）平台对管道系统支吊架参数和位置进行的优化设计可在保证系统抗冲击能力的前提下有效降低空间复杂管道系统的振动传递，为空间复杂管道系统的振动控制提供了有效途径。

参考文献：

- [1] 梁向东, 付爱华. 非金属阻尼与挠性接管在管路减振中的作用[J]. 噪声与振动控制, 2002, (2): 30-31.
- [2] 邓亮, 周炜, 何琳. JYXR 型挠性接管减振性能试验研究[J]. 航海工程. 2002, (4): 9-11.
- [3] 王强, 胡明, 姚本炎, 等. 船用往复泵管路减振技术研究[J]. 船舶工程, 2002, (1): 27-31.
- [4] CHOI J B, LAKES R S. Non-linear properties of polymer cellular materials with a negative Poisson's ratio[J]. Journal of Materials Science, 1992, 27(17): 4678-4684
- [5] CHEN C P, LAKES R S. Holographic study of conventional and negative Poisson's ratio metallic foams: elasticity, yield and micro-deformation[J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(20): 5397-5402
- [6] ALDERSON K L, WEBBER R S, MOHAMMED U F. An experimental study of ultrasonic attenuation in micro-porous polyethylene[J]. Applied Acoustics, 1997, 50(1): 23-33
- [7] 伍先俊, 程广利, 朱石坚. 最小振动功率流隔振系统 ANSYS 优化设计[J]. 武汉理工大学学报. 2005, 29(2): 186-189.

(责任编辑：孙 凯)