

# Research on Influence of Vibration Isolator Arrangement on Vibration Isolation Performance

Wei Huang<sup>1,2,3</sup>, Jian Xu<sup>2</sup>, Tongyi Zhang<sup>2</sup>, Xinzheng Lu<sup>1</sup>, Mingyi Hu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing

<sup>2</sup>China IPPR International Engineering Co. Ltd. Technology Research Center of Engineering Vibration Control, Beijing

<sup>3</sup>Beijing Materials Handling Research Institute Co. Ltd., Beijing

Email: [huangweiac@126.com](mailto:huangweiac@126.com)

Received: Sep. 9<sup>th</sup>, 2019; accepted: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2019; published: Sep. 29<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The vibration isolator arrangement has an important influence on the posture, stability and vibration isolation effect of the vibration isolation system. In this paper, the vibration isolation performance of four typical vibration isolator arrangements were studied, and the results showed that the five-point support is more reasonable than the three-point support, four-point support and six-point support, and the usually used four-point and six-point support were proved not the most ideal way. In final, the decoupling strategy based on the coincidence of mass and stiffness was performed out, by which the adverse effects of the system caused by the coupling of degrees of freedom could be effectively eliminated. This study has certain implications for the optimal design of the vibration isolation system, and it also plays a guiding role in the actual engineering.

## Keywords

Vibration Isolators, Arrangement, Vibration Isolation Performance, Decoupling Strategy

---

# 隔振器布置方式对隔振性能影响研究

黄伟<sup>1,2,3</sup>, 徐建<sup>2</sup>, 张同亿<sup>2</sup>, 陆新征<sup>1</sup>, 胡明祎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>清华大学土木工程系, 北京

<sup>2</sup>中国中元国际工程有限公司工程振动控制技术研究中心, 北京

<sup>3</sup>北京起重运输机械设计研究院, 北京

Email: [huangweiac@126.com](mailto:huangweiac@126.com)

收稿日期: 2019年9月9日; 录用日期: 2019年9月22日; 发布日期: 2019年9月29日

## 摘要

隔振器布置对隔振体系位姿、稳定性及隔振效果等具有重要影响。本文对四种典型的隔振器布置方式的隔振性能进行了研究,结果表明五点支撑式相比三点支撑式、四点支撑式和六点支撑式更加合理,而常用的四点支撑式及六点支撑式并非理想体系。基于质刚重合的解耦策略可以有效降低自由度耦合带来的体系不利影响。本研究对于隔振体系优化设计具有一定的启示,对实际工程亦有指导作用。

## 关键词

隔振器, 布置, 隔振性能, 解耦

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

隔振平台是由多个隔振单元采用多点支撑方式组合而成的隔振系统,受控对象的振动控制转变为台面的姿态控制或者位置控制,最终表现为多个支撑点的控制[1] [2],多隔振器布置方式的合理性至关重要,直接影响隔振体系的位姿、稳定性及隔振效果等。

隔振器布置决定了其体系特性,当使用三个隔振器时,由于三点可以确定一个平面,平台的位姿唯一;超过三个隔振器时,台面的位姿由其主承载作用的三个隔振器决定,当姿态发生变化时,负载分布也会发生变化,引起承载再分配,并再次引起位姿变化[1] [3] [4] [5] [6] [7]。

本文针对四种隔振器布置的隔振平台,分别进行了模态、谐响应以及随机振动荷载的隔振特性研究,获得了相关规律,并在此基础上开展了基于质刚重合的解耦策略研究。

## 2. 四种不同隔振器布置的隔振平台

研究对象由高刚性基台、隔振器等组成,隔振器主要由钢弹簧和油液阻尼并联构成,刚度、阻尼不考虑非线性。隔振器布置分三角形三点支撑(3型)、矩形四点支撑(4型)、右凸形五点支撑(5型)以及矩形六点支撑(6型)方式,如图1所示。基台尺寸为:  $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ ,隔振体系竖向设计频率  $3.5\text{ Hz}$ ,水平向刚度为竖向的  $0.7$  倍。图2给出了有限元计算模型。

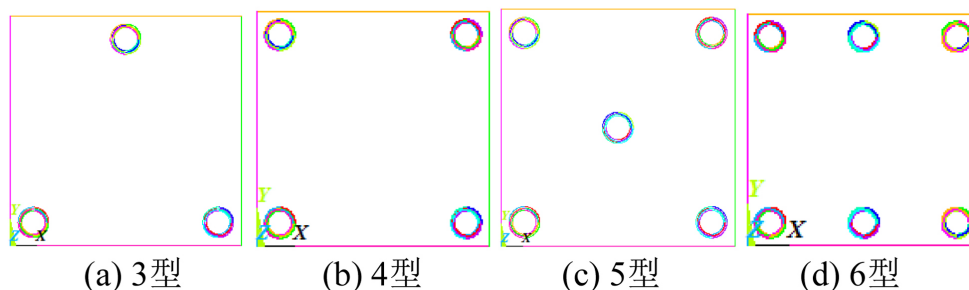


Figure 1. Vibration isolation platform with four different vibration isolators

图1. 四种不同隔振器布置的隔振平台

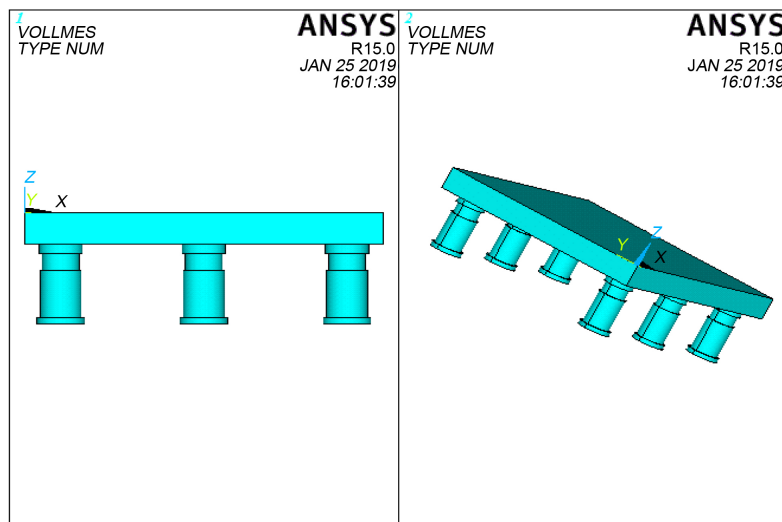


Figure 2. Finite element calculation model of vibration isolation system  
图 2. 隔振体系有限元计算模型

### 3. 模态特性研究

模态结果表明四种姿态的隔振平台前 6 阶均为隔振平台的整体振型，分别为：沿 x、y、z 轴平动及绕 x、y、z 轴转动，属于隔振体系整体振型；7 阶及更高阶为基台局部振型(表 1 给出了 4 型隔振平台第 1~6 阶局部振型即整体第 7~12 阶模态频率)，故只考察隔振体系整体特性的前 6 阶模态。

Table 1. Modal frequencies from the 1st to 6th order of “4” vibration isolation platform (7th to 12th order in the overall modes)

表 1. 4 型隔振平台第 1~6 阶(整体第 7~12 阶)模态频率

局部阶数	整体阶数	频率(Hz)
1	7	196.61
2	8	286.30
3	9	315.58
4	10	478.01
5	11	482.71
6	12	780.29

由图 3 以及模态计算结果可知，1、2 阶均为沿 x、y 方向为主的平动，3 阶均为沿 z 方向的竖向振动，其中 5 型的第 3 阶为绕 z 向转动，竖向振动发生在 4 阶。4 型的 4~6 阶模态频率，均要高于其它布置方式，而 5 型的整体模态频率较小。由此说明，在实际工程中常用的 4 型或者 6 型隔振方式未必是最合理的隔振设计。3 型属于三点支撑式，由于三点确定一个平面，尽管隔振平台的位姿可以唯一，但其体系设计也并非最优，下面将进一步阐述。

### 4. 谐响应特性研究

对四种不同的隔振体系开展谐响应分析，扫频范围：1~10 Hz，沿 x、y、z 方向施加全局加速度，均为  $1 \text{ m/s}^2$ ，并提取台板上表面中点的响应。因考虑隔振器阻尼的存在会抑制峰值，造成对其隔振体系固有特性的不准确判断，故不考虑隔振器阻尼，但考虑一定的结构阻尼。

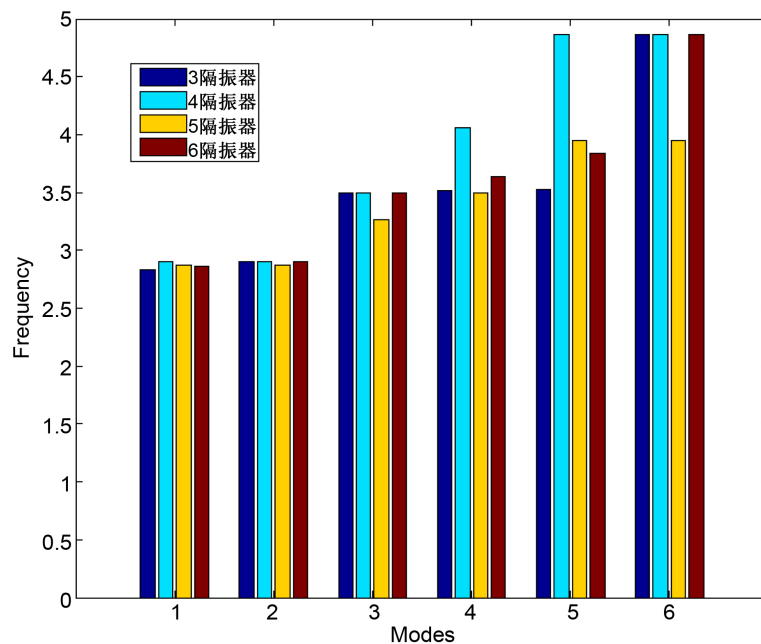


Figure 3. Comparison of the first six modal frequencies of the vibration isolation platform with four different isolators

图 3. 四种不同隔振器布置的隔振平台前六阶模态频率对比

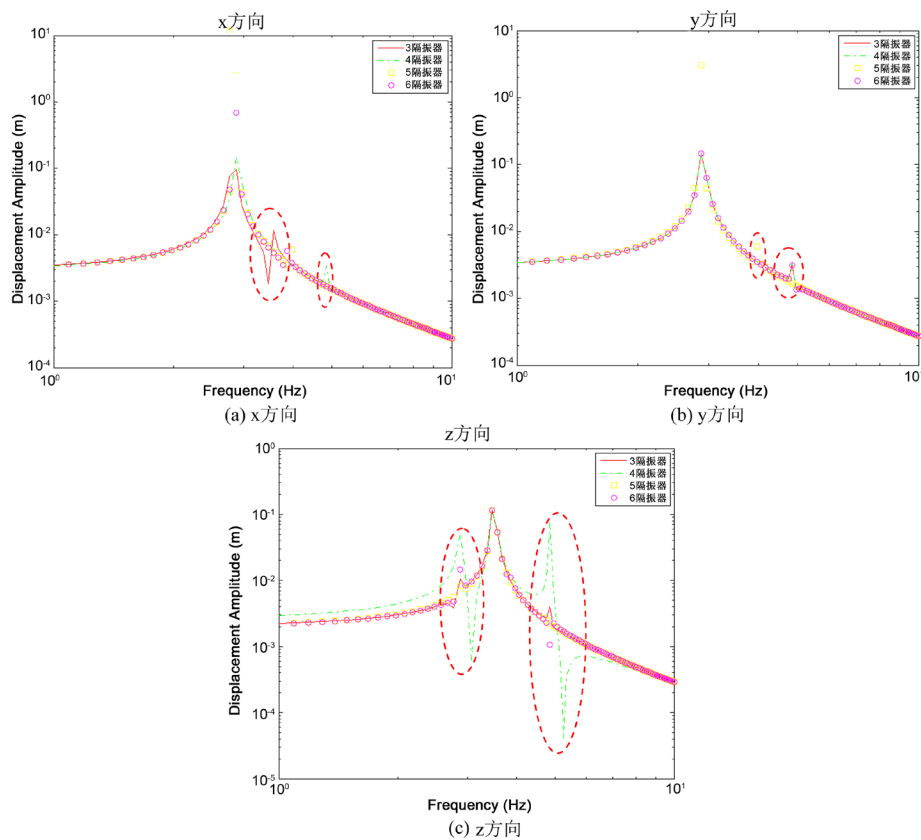


Figure 4. Comparison of harmonic response of vibration isolation platform with four different isolators

图 4. 四种不同隔振器布置的隔振平台谐响应对比

由图4可见, x方向的响应中5型最大, 6型、4型依次之, 但3型与4型除主峰值点外, 有明显其它峰值; y方向的响应中5型最大, 但4型、6型都有其它峰值; z方向的响应中, 四种类型的主峰值相差不多, 但4型存在明显其它峰值。因此, 整体来看, 5型隔振体系频响曲线平滑性要优于其它四种方式。

## 5. 白噪声响应特性分析

对四种隔振体系分别开展随机白噪声作用下的响应特性研究, 给定的白噪声加速度信号位于区间 $[-1,1] \text{ m/s}^2$ , 如图5所示。

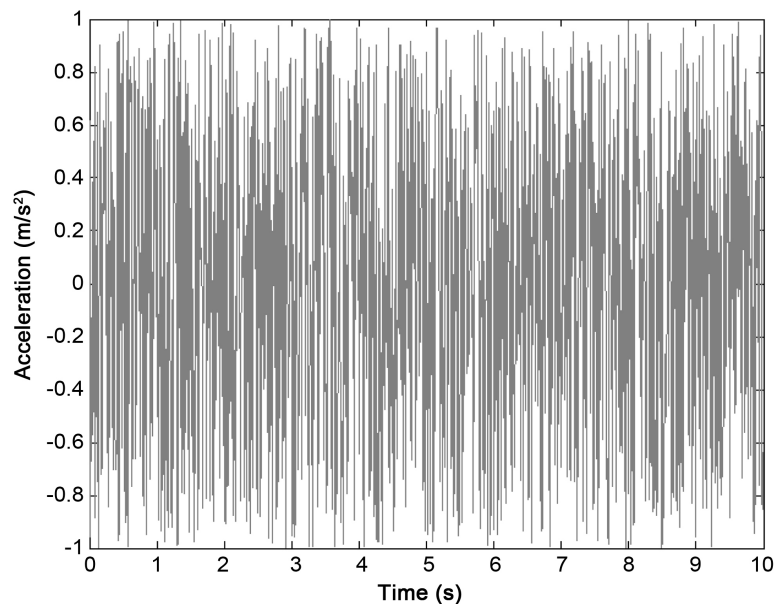


Figure 5. White noise acceleration signal  
图5. 白噪声加速度信号

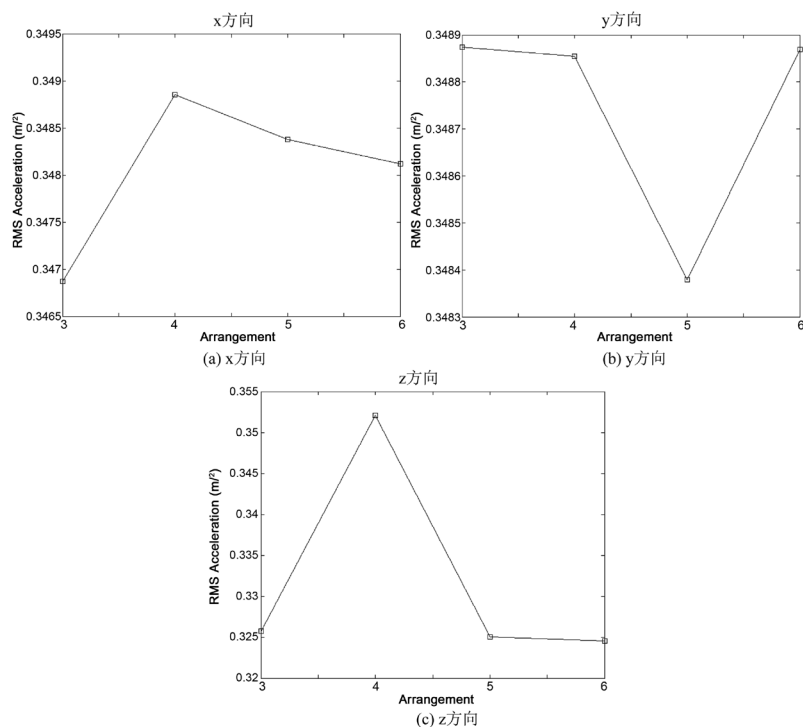
由图6可见, x方向的响应中, 3型、5型、6型相对较小, 3型最小, 4型较大; y方向的响应中, 3型、4型、6型相比较, 5型最小; z方向的响应中, 4型最大, 3型、5型、6型相比较小。由此可知, 常见的4型隔振平台, 并非理想方式。

对四种不同隔振器布置的隔振平台在白噪声加速度的振动激励下的响应进行FFT分析, 由图7可见, 隔振体系在3.5 Hz附近区域共振, 可以对高于该共振区域的频段激励进行有效滤除, 体现了隔振体系设计的重要性; 此外, x、y方向的幅值和频谱曲线基本一致, 差别很小, 但是4型布置方式的z方向幅值要明显高于其它方式。

## 6. 质刚重合的解耦策略

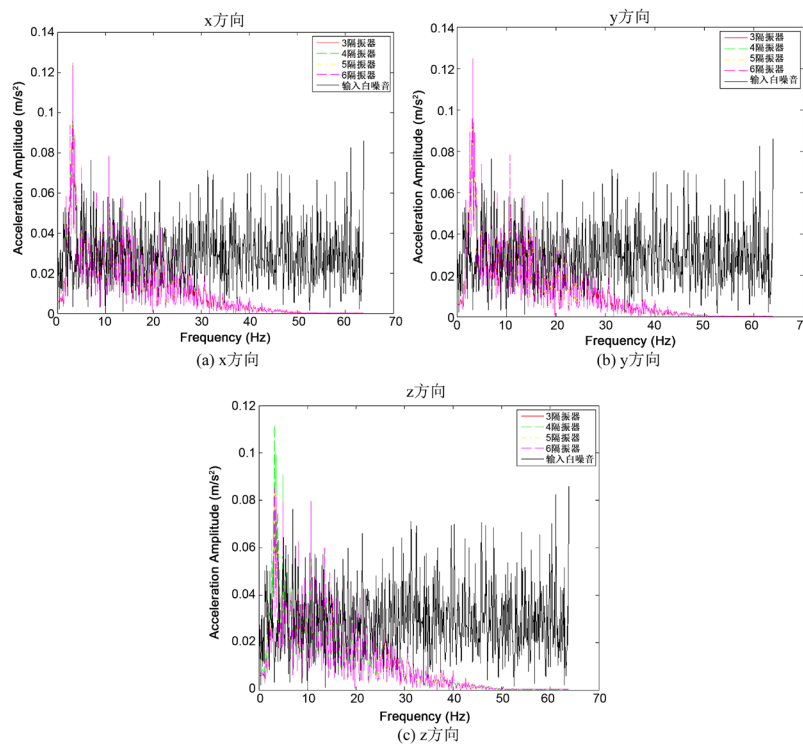
由以上研究可见, 常用的4型隔振平台, 却非最理想方式, 但由于其安装方便、易设计, 应用较多, 为了使其更好地应用至实际工程, 对其开展基于质刚重合原理的解耦策略研究。将基台板挖掉4个柱坑, 以使隔振器上端部嵌入基台中轴位置, 如图8所示。

由图9可见, 解耦状态下的x、y向谐响应峰值较非解耦状态有明显降低, z向谐响应在共振峰前明显小于非解耦状态; 此外, 解耦体系可以有效避免因自由度耦合带来的除主共振峰外的其他易共振点发生, 作用显著。因此, 在实际工程中, 应尽量使体系实现质刚重合。



**Figure 6.** Comparison of white noise RMS response of vibration isolation platform with four different isolators

**图 6.** 四种不同隔振器布置的隔振平台白噪声有效值对比



**Figure 7.** Comparison of white noise filtering effects of vibration isolation platform with four different isolators

**图 7.** 四种不同隔振器布置的隔振平台白噪声滤波效应对比

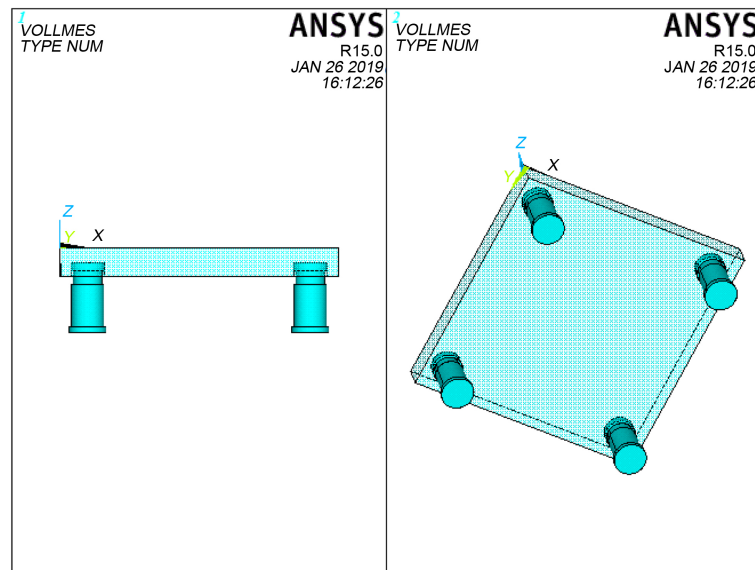


Figure 8. Coincidence strategy of and mass and stiffness of vibration isolation system

图 8. 隔振体系质刚重合策略

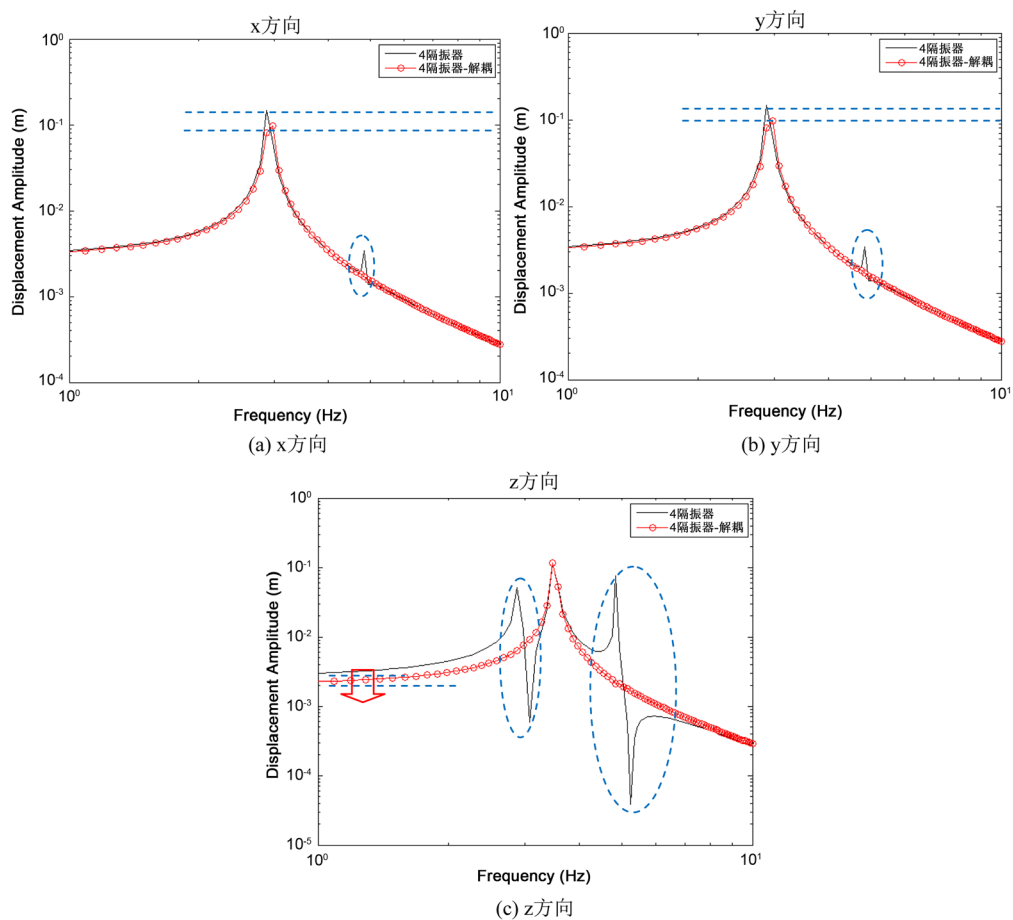


Figure 9. Comparison of harmonic response in decoupled and non-decoupled conditions

图 9. 解耦与非解耦状态下的谐响应对比

## 7. 结论

本文开展了四种不同的隔振器布置对隔振性能影响研究,包括:模态、谐响应、白噪声滤波效应计算分析,结果表明:常用的四点、六点支撑方式并非最优,五点支撑式相比而言更加合理;考虑到四点支撑应用较为普遍,为此开展基于质刚重合的体系解耦研究,结果表明解耦可以有效消除自由度耦合带来的不良效应,效果显著。故在实际的工程振动控制中,应针对振源特性、基台几何特性、隔振器布置、体系解耦等开展详细的优化设计与计算分析。

## 基金项目

本研究得到国家重点研发计划“既有工业建筑结构振动控制技术研究(2016YFC0701302)”和中国机械工业集团重大技术开发专项(SINOMAST-ZDZX-2017-05)的资助。

## 参考文献

- [1] 付炼. 双腔室空气弹簧隔振平台的研制[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [2] 谷宁昌, 张煜盛. 隔振器布置和安装研究[J]. 船舶工程, 2007, 29(2): 30-33.
- [3] Pu, H., Luo, X. and Chen, X. (2011) Modeling and Analysis of Dual-Chamber Pneumatic Spring with Adjustable Damping for Precision Vibration Isolation. *Journal of Sound and Vibration*, **330**, 3578-3590. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.03.005>
- [4] Lee, J., Ghasemi, A.H., Okwudire, C.E., et al. (2017) A Linear Feedback Control Framework for Optimally Locating Passive Vibration Isolators with Known Stiffness and Damping Parameters. *Journal of Vibration and Acoustics*, **139**, 011006. <https://doi.org/10.1115/1.4034771>
- [5] Liew, K.M., Lam, K.Y. and Chow, S.T. (1990) Free Vibration Analysis of Rectangular Plates Using Orthogonal Plate Function. *Computers & Structures*, **34**, 79-85. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(90\)90302-1](https://doi.org/10.1016/0045-7949(90)90302-1)
- [6] 杜奎, 伍先俊, 程广利, 等. 浮筏隔振系统隔振器最佳布置方案研究[J]. 海军工程大学学报, 2005, 17(2): 92-94.
- [7] 黄伟, 徐建, 朱大勇, 等. 主动隔振下固支薄板基础振动抑制的参数多目标优化[J]. 计算力学学报, 2015(4): 457-464.