

基于模态实验的细长体两点 激振试验方案的制定

程鹏斌, 李敏伟, 马超, 刘攀峰

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘要: **目的** 细长体两点激振试验方案中, 更好地选择激励位置、控制位置和悬挂点的位置。**方法** 制定两点激振试验方案时需要参考试件的模态信息。**结果** 根据试验方案的确定方法和模态试验理论, 利用试件模态的模态试验结果, 建立了一种试验方案制定时的激振位置、控制位置、悬挂位置计算方法, 量化了试验方案的确定方法。**结论** 通过两种试验方案控制位置、悬挂位置计算数值的对比, 可以直观地对比不同试验方案的优劣, 有利于两点激振试验方案的制定和选择。

关键词: 模态实验; 两点激振; 激励位置; 控制位置

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.06.002

中图分类号: V416.2; O324 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)06-0007-04

Design of Slender Dual-exciter Vibration Test Program Based on Modal Test

CHENG Peng-bin, LI Min-wei, MA Chao, LIU Pan-feng
(China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028)

ABSTRACT: Objective To select proper position for excitation, control and suspension in slender dual-exciter vibration test. **Methods** The modal results can be referenced when designing the testing program before the dual-exciter vibration test. **Results** Based on the designing method of testing program and the modal test theory, the calculation formulas of excitation location, control location and hanging location were established when designing the testing program based on the modal test results. **Conclusion** Comparison of two test programs in numerical calculation of excitation, control and suspension position could compare advantages and disadvantages of two test programs and be favorable for making and selection of dual-exciter vibration test program.

KEY WORDS: modal test; dual-exciter vibration; excitation location; control location

细长体两点激振试验比传统单输入单输出的振动试验更为复杂, 试验时激振位置、控制位置以及悬挂位置的确定对于细长体两点激振试验的成败有重大影响。为了更准确地设计和控制两点激振试验, 试验前要获取细长体试验件的模态信息, 根据所获取的模态信息制定适合的试验方案^[1-4]。

制定两点激振试验方案的主要工作是确定试验时的激振位置、控制位置和悬挂位置。1996年

DeClerck 提出利用平均位移响应方法选择试验时的激振位置, 英国帝国学院的 Ewins 教授提出悬挂点应选取在结构位移响应最小的位置^[5-7]。制定细长体两点激振试验方案时一般都会借鉴这两个基本确定方法。这两个确定方法是指导性的, 并无具体的计算方法或计算公式, 无法直接制定出最佳试验方案, 或者出现多个试验方案时没有计算结果比对, 都要依靠实验人员的经验来判断试验方案的优劣或逐一对可能

的试验方案进行验证,导致试验进度滞后。为了便于更准确地制定细长体两点激振试验方案,需要一种量化计算公式,通过不同试验方案的计算结果能直观比较试验方案的优劣。

1 试验

1.1 制定两点激振试验方案的方法和面临的问题

细长体两点激振试验是典型的多输入多输出试验。多输入多输出振动试验系统中如果有 m 个驱动信号激励系统和 n 个响应信号,则驱动信号与控制信号之间的关系可描述为^[2-3,8]:

$$\{C_m(f)\} = [H_{m \times n}(f)]\{D_m(f)\} \quad (1)$$

当 $m=n$ 时,即振动试验的激励点数与控制点数相同,此时 $[H(f)]$ 是方阵,它的非奇异逆是存在的,求解较为方便,试验时利于控制。因此在制定试验方案时,两点激振试验的控制点数一般选择为与激振点数相同。

制定试验方案时,需要参考细长体试件的模态信息包括:固有频率 ω_i ; 模态振型波峰,即每阶模态振型极大值点;模态振型节线,即每阶模态振型振动为 0 的地方。不同的位置对于试验影响巨大^[2]。激振位置的选取是两点激振试验成功的首要因素,选取不当可能会使某些模态频率附近的响应很弱或无法激励出来,特别是选择在振型节线处时,会造成试验件局部响应过大,最终使试验控制超差,甚至无法控制,更严重的可能会对试件结构造成损坏,因此选择激振位置首先要避开振型节线。激振位置应确保激励源能激励出结构的各阶模态,并且在结构不同频率上均有较大响应。选择悬挂位置时应选取在结构位移响应最小的位置,以降低连接处的干扰影响,即选在振型的节线附近^[2,6-7]。

根据两点激振试验方案选择方法和模态试验信息,试验人员凭借经验可以制定出大致细长体两点激振试验方案,但是只使用了模态试验中的波峰、节线等位置信息,没有直接使用模态试验的数值信息,对于方案的准确性也难以判断。如果遇到出现两种以上的可能方案时(如图 1 所示),也无法判断方案优劣,因为没有具体对比方式或数值可以比较两种实验方案。因此基于模态试验结果,依靠目前指导性的试验方案确定方法,制定细长体两点激振试验方案时面临的问题包括:没有基于模态数据的参数化计算公式;多种试验方案无法量化比较;无法准确评估已有试验方案。

1.2 模态实验分析理论

多自由度系统的动力学拉氏域方程为^[9-10]:

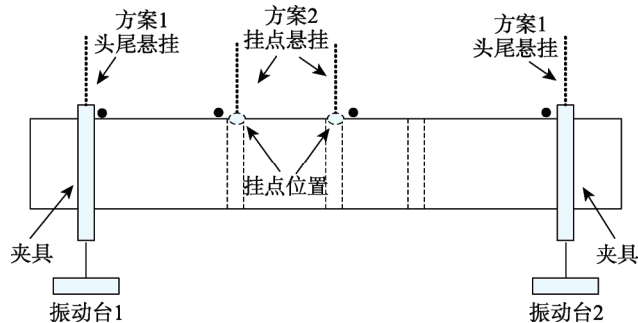


图 1 细长体试验件 MIMO 试验时的两种试验方案

$$([K] + j\omega[C] - \omega^2[M])\{X(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (2)$$

式中: $[M]$, $[C]$, $[K]$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{X\}$, $\{F\}$ 分别为响应向量和载荷向量。

令: $\{X\} = [\Phi]\{q\}$, 其中 $[\Phi]$ 为振型矩阵, $\{q\}$ 为模态坐标, 有:

$$([K] + j\omega[C] - \omega^2[M])[\Phi]\{q\} = \{F\} \quad (3)$$

根据振型矩阵的正交性关系,将质量、刚度、阻尼矩阵对角化,并将方程解耦,表示为模态坐标下相互独立的 N 自由度系统的方程组。解耦后第 i 个方程为:

$$(k_i - \omega^2 m_i + j\omega c_i) q_i = \sum_{j=1}^N \phi_{ij} F_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

传递函数用模态参数表示为:

$$H(\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{\{\phi_r\} \{\phi_r\}^T}{m_r (\omega_r^2 - \omega^2) + j 2 \xi_r \omega \omega_r} \quad (5)$$

式中: $\omega_r^2 = \frac{k_r}{m_r}$ 第 r 阶模态频率, $\xi_r = \frac{c_r}{2m_r \omega_r}$ 第 r 阶模态阻尼比。

假设用第 r 阶模态的固有频率激励,仅考虑式(5)中贡献最大的部分,则式(5)可以表示为:

$$H_{ij}(\omega_r) \approx \frac{\phi_{i,r} \phi_{k,r}}{2j \xi_r \omega_r^2} \quad (6)$$

可以看出,贡献最大的部分正比于位移幅值的向量,因此模态坐标下位移幅值有如下关系:

$$\text{位移幅值} \propto \frac{\phi_{i,r} \phi_{k,r}}{\omega_r^2} \quad (7)$$

根据位移、加速度的表达式:

$$x(t) = X(t) e^{i\omega_r t} \quad (8)$$

$$\ddot{x}(t) = -\omega_r^2 X(t) e^{i\omega_r t} \quad (9)$$

可以得到模态坐标下加速度幅值的关系:

$$\text{加速度幅值} \propto \phi_{i,r} \phi_{k,r} \quad (10)$$

1.3 试验方案选择计算方法

细长体两点激振试验方案选择的计算方法基于细长体试件的模态试验结果,根据试验方案的确定方法,建立一种试验方案的参数化计算公式,即通过比

较方案不同方面参数的数值来评价试验方案。

1.3.1 激振位置选择计算方法

进行振动试验时,如果激励位置选在某阶模态振型的节线上或其附近位置,只有极少的能量传递到该阶模态,导致该阶模态频率附近的响应非常小,因此最适合的激振位置,应确保结构不同频率上均有较大响应^[10-11]。

为避开振型节线,并且激励位置的结构响应最大,应将激振点布置在远离结构各阶振型的节线位置^[8]。如式(11)所示,将结构每个点的各阶振型值连乘得出的结果作为每个点的最优激振位置参数值。

$$OP(i) = \prod_{r=1}^m |\varphi_{i,r}| \quad (11)$$

式中: $\varphi_{i,r}$ 为结构上的第 i 点第 r 阶振型; r 为模态阶数; m 为结构的模态总阶数。

OP 数值越高,代表该点越远离结构各阶振型的节线位置,可以考虑作为激振点; OP 数值接近于 0 的点代表其接近阶振型的节线处,激振点应尽可能避开这些位置。在实际使用中,当 m 值比较大时,连乘得出的数值都会很小,从而失去了比较的意义,因此一般取试件的前 6 阶模态数据进行计算。

通过计算 OP 数值得到的最大数值在试验时并不一定会选作激振位置,还要根据细长体试件的实际使用情况进行取舍。一般会在最好的几个位置中选择适合的激振位置,比如在细长体上容易安装试验工装的位置或两个振动台的最佳距离。另外,如果两点激振试验的激振位置已经确定,可以通过计算所有参考点的 OP 值来分析激振位置在整个试件上的响应情况,并根据激振位置的特点调整控制参数。

1.3.2 控制位置选择计算方法

控制位置的选择原则与激振位置选择基本一致,因此控制位置的参数值计算也用式(9)表示。与激振位置类似, OP 值越大越适合作为控制点,实际使用

中也是取前 6 阶模态数据进行计算。通过计算 OP 数值得到的最大数值在都可以当作控制点的备选点,可以根据试验时的实际情况进行选择,比如细长体上靠近安装点的位置或者预先选定的关键位置。

1.3.3 悬挂位置选择计算方法

细长体进行两点激振试验时,应尽量模拟试件的“自由-自由”条件,一般通过用软弹簧或橡皮绳悬挂来近似实现。选取软橡皮绳在试件上的悬挂位置时,应保证连接处对结构的干扰影响降到最低^[1,10-11]。当选取在结构位移响应最小的位置时,对于试验的干扰最小。结构在单位激励下的位移响应参数值,数学表达式为:

$$OF(i) = \sum_{r=1}^m \frac{|\varphi_{i,r}|}{\omega_r^2} \quad (12)$$

式中: OF 是结构模型上该点的位移响应参数值。计算结构模型中所有点的 OF 值,数值越低的点,平均位移响应越小,离结构各阶模态振型节线越近,越适合作为悬挂点。通过选取 OF 值最小的点就能有效地降低悬挂点对结构的连接干扰影响,从而更真实地模拟结构的自由-自由边界条件。

式(12)一定程度上弱化了高阶模态数据的影响,因为对于结构位移的影响主要是结构的前几阶模态起作用。如果前几阶模态频率较大,比如大于 200 Hz,计算得到的结果都非常接近,也就意味着各点作为悬挂位置的区别不大。

2 结果

某细长体试件使用 LMS Test.lab 软件对试件“自由-自由”状态进行模态实验,使用 BK 公司 4508 型 ICP 传感器。通过模态试验得到图 1 所示两种悬挂方案的部分模态信息见表 2。计算出对比试验方案悬挂位置的 OF 值、 OP 值见表 3。

表 2 细长体前 5 阶模态结果

频率/Hz	方案 1 第一点	方案 1 第二点	方案 2 第一点	方案 2 第二点
52.34	-5.12E-07	-2.39E-06	1.91E-06	2.99E-06
76.3	7.81E-07	3.10E-07	-1.35E-06	-8.66E-07
92	2.20E-07	1.25E-06	1.37E-06	-2.90E-06
132	4.33E-06	5.47E-07	2.61E-06	8.19E-08
176	-1.50E-07	-4.66E-07	-1.65E-06	-9.44E-07

表 3 两种试验方案计算结果对比

比较方案	方案 1 第一点	方案 1 第二点	方案 2 第一点	方案 2 第二点
OF 值	6.01E-10	1.12E-9	1.30E-9	1.66E-9
OP 值	5.71E-32	2.36E-31	1.52E-29	5.80E-31

通过对比 OP 值, 方案 1 的计算值平均值小于方案 2, 因此方案 1 优于方案 2, 在试验时应按照方案 1 进行悬挂。控制位置的最优排序为方案 2 第 1 点、方案 1 第 2 点、方案 2 第 2 点、方案 1 第 1 点。

将图 1 所示的细长体分别按照方案 1 和方案 2 悬挂时进行两点激振试验, 对悬挂方案优劣进行验证。方案 1、2 水平方向试验控制通道的加速度 RMS 值均为 $5.6g$, 方案 1 头部监测点垂直方向监测到的加速度 RMS 值为 $2.04g$, 方案 2 监测到的加速度 RMS 值为 $2.49g$ 。通过头部监测点结果可知, 试验方案 1 在振动试验时目标监测点的响应量级较小, 可以避免不合理的悬挂对于试验过程的影响。

3 结论

文中分析了模态实验结果在细长体两点激振试验应用时存在的问题, 为量化计算试验方案选择时的指导原则, 基于试件的模态实验结果建立了激振位置、控制位置以及悬挂位置的计算方法, 为两点激振试验方案的制定提供了一种量化计算方法, 利用详细的模态实验信息, 参考计算数值结果试验人员可以快速准确地制定出较为合适的试验方案。

参考文献:

- [1] 赵怀耘, 田光明, 钟继根. 两点激励振动试验时结构模态对控制效果的影响分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 51-53.
- [2] 程鹏斌, 李大鹏, 赵晨. 锤击法在细长体两点激振试验中的研究及应用[J]. 环境技术, 2014, 32(2): 6-9.
- [3] HAMMA G. STI multiple Vibration Exciter Control replicates the Real world in Your Laboratory[J]. STI Journal, 1989, 1(2): 1-4.
- [4] 陈颖, 田光明, 钟继根. 典型细长体结构的两点激励振动试验设计[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(1): 68-71.
- [5] 陈家焱, 王海东, 周建川, 等. 多点激励振动试验控制技术进展[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 69-73.
- [6] IMAMOVIC N. Validation of Large Structural Dynamics Models Using Modal Test Data[D]. London: Imperial College, 1998.
- [7] HAKIM S, FUCHS M. Optimal Actuator Placement with Minimum Worst Case Distortion Criterion[C]// Proceedings of AIAA 36th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Adaptive Structures Forum. 1995.
- [8] 刘渊. 结构振动模态测试优化技术的研究及其应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [9] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [10] 沃德·海伦. 模态分析理论与试验[M]. 北京理工大学出版社, 2001.
- [11] 刘习军, 贾启芬, 张文德. 工程振动与测试技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.