



中华人民共和国国家标准

GB/T 2423.62—2018

环境试验 第2部分:试验方法 试验 Fx 和导则:多输入多输出振动

Environmental testing—Part 2: Test methods—Test Fx and guidance: Multit input
multit output vibration test

2018-12-28 发布

2019-07-01 实施

国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	I
1 范围	1
2 术语和定义	1
3 试验设备	1
3.1 一般要求	1
3.2 多激励振动试验系统	2
3.3 振动控制系统	3
3.4 振动测量系统	4
4 试验方法与条件	4
4.1 选择振动试验方法	4
4.2 选择试验方法	5
4.3 确定试验方案	5
4.4 确定试验条件	5
4.5 样品安装	6
4.6 试验容差	6
5 信息要求	8
5.1 概述	8
5.2 试验前需要的信息	8
5.3 试验中需要的信息	8
5.4 试验后需要的信息	9
6 试验实施	9
6.1 试验准备	9
6.2 试验程序	9
6.3 中间检测	14
6.4 恢复	14
6.5 最终检测	14
6.6 中断	15
6.7 试验安全保护措施	15
7 结果分析	16
8 有关规范应给出的内容	16
9 试验报告应给出的信息	16
附录 A (资料性附录) 多激励振动试验夹具	18
附录 B (资料性附录) 刚体空间运动测量原理	28
附录 C (资料性附录) 时不变线性多自由度系统辨识	31
参考文献	37

前 言

GB/T 2423《环境试验 第2部分》按试验方法分为若干部分。

本部分为 GB/T 2423 的第 62 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分由全国电工电子产品环境条件与环境试验标准化技术委员会(SAC/TC 8)提出并归口。

本部分起草单位:工业和信息化部电子第五研究所、杭州亿恒科技有限公司、北京航空航天大学、中国航天科技集团公司第一研究院第七零二研究所、北京卫星环境工程研究所、中国航空综合技术研究所、浙江大学。

本部分主要起草人:解禾、纪春阳、陈章位、吴飒、韦冰峰、向树红、孙建勇、徐琦。

环境试验 第2部分:试验方法

试验 Fx 和导则:多输入多输出振动

1 范围

GB/T 2423 的本部分规定了多输入多输出振动(以下简称:MIMO)试验方法的术语和定义、试验设备、试验方法与条件、信息要求、试验实施及结果分析的要求。

本部分适用于确定或验证在经受多激振器激励后样品的机械薄弱环节和/或特性降低情况。本试验方法也可用于验证样品的机械结构和功能完好性以及研究它们的动态特性。

2 术语和定义

2.1

多输入单输出 multi input single output;MISO

多自由度结构中多驱动信号输入到激振系统,以及单自由度结构中从固定装置或样品上得到单参量测量输出。

注:这个专业术语多应用于多输入测量合成单输出情况下的测量数据处理。

2.2

多输入多输出 multi input multi output;MIMO

多自由度结构中多驱动信号输入到激振系统,以及多自由度结构中从固定装置或样品上得到多测量输出。

注:一般输入和输出之间没有一一对应的关系,输入的编号也和输出编号不同。

2.3

多激励单轴 multi exciter single axis;MESA

应用多个激振器在单矢量方向提供动态输入至样品。

注:如扩展的设备可能在单矢量轴的前面和后面需要激励。对于两激振器关于其幅值和相位按照共同条件激励,其输出基本可以由单轴激励描述。对于两激振器按照独立幅值或相位条件激励时,其输出可能需要按照前轴、后轴以及(可能)样品重心的旋转轴来描述。

2.4

多激励多轴 multi exciter multi axis;MEMA

用多个向量对激励和测量进行完整描述时,应用多个激振器提供动态输入至样品。

注:在本部分中,只使用了多激励单轴和多激励多轴,然而,对于测量数据处理来说,单输入单输出、单输入多输出、多激励单轴和多激励多轴都是可适用的。

2.5

机械解耦装置 mechanical decoupling device

多激振器振动试验中,安装在激振器与样品、夹具或整体台面之间,用于消除或减小多个激振器耦合运动影响的机械装置。

3 试验设备

3.1 一般要求

多激励振动试验设备要求根据试验类型、样品的状态,选择适当配置构成的试验平台、安装样品的

夹具、控制器以及用于记录样品在指定控制和监测位置响应的仪器。

本部分利用多激励振动试验平台(激振器、解耦装置或台面)、安装夹具、振动控制器、振动测量和分析仪、传感器及其调理放大器、辅助装置。总体应能达到 4.3 规定的试验方案、4.4 规定的试验条件和 4.6 规定的试验容差要求。

3.2 多激励振动试验系统

3.2.1 激振器

根据所要求的试验类型、试验频率范围、低频位移、试验量级以及样品和夹具的尺寸、质量来确定激振器配置并选定激振器,激振器可以是电动式的或液压式的。

多激励系统主要由三个部分组成:激振器、夹具和控制器。激励器根据需要在同一平面内运行,也可相互独立,提供足够的位移,以便能进行相应样品质量和加速度量值的试验。在使用多激励系统时,重点考虑对每个激振器使用增益控制,这样可以对控制回路的差异进行限制,以得到满足给定限制范围的控制效果。缩短控制回路更新时间,延长记录长度,提高控制精度。以自由度定义的统计精度对计算结果非常重要。自由度的值取决于达到满量值前的预试验量值(-6 dB、-3 dB、0 dB 等)。随着试验量值越来越趋近于满量值,自由度的数值越来越大。自由度的数值应满足在 99% 置信水平下,能得到规定值 5% 偏差范围内的结果,或在 -3 dB 量值达到 95% 置信水平。采用实时闭环控制方法,统计精度会随着试验的进行持续提高。

3.2.2 试验夹具

夹具设计应符合振动标准的要求,夹具设计在实际中还要考虑到频率响应和承受反作用力的能力,要考虑在多点多轴试验时潜在将产生大负载导致在多个自由度上同时产生加速度。试验夹具要求如下:

除通用的试验夹具设计要求外,多轴试验夹具设计参照附录 A。

规定多激励器试验要求时,试验夹具非常关键。夹具尽可能模拟产品使用期结构支撑,以便复现产品使用时的动力学载荷和结构动态响应特性。

根据产品和试验方法的不同,夹具的形状和尺寸会有很大不同。可以考虑采用刚性的和柔性的连接装置,如下:

- a) 用连接器(俗称“牛头”)连接或与结构直接连接;
- b) 用柔性驱动杆和刃型支撑直接连接;
- c) 使用根据需要限定的运动自由度的转轴、球形节等连接;
- d) 使用具有上述装置的滑台。

为帮助夹具和控制策略的选择与评估,应考虑下列产品不同的动态响应特性。应根据产品的动力学复杂性和尺寸,合理确定振动试验夹具、试验谱和控制策略,如下:

- a) 不同长径比的柔性对称动力学结构;
- b) 带有柔性末端的刚性动力学结构;
- c) 动力学和几何形状上非对称结构;
- d) 大型刚性结构,此时推力是主要问题;
- e) 所有采用上述类别的运输和贮存的容器。

应考虑被试样品的主支撑的布局。原则上,夹具本身应具有足够的刚度以支承样品,同时尽可能减小正交轴的耦合影响和激振器的轴外影响。非预期的正交轴运动应尽可能小。在进行夹具设计时要特别关注刚体模态,不过随着控制算法的改进,这个问题有可能可以解决。同时也应考虑在产品内部存在位移的差异,并且这种差异会怎样影响激振器。控制系统并不能在任何情况下都可以适应不合理的夹

具设计。

3.2.3 试验装置

多激励振动试验要求试验配置能约束不被激振器控制的自由度,而使受控的自由度无约束。应在完成试验平台安装后进行运动评估,确定合适的联接器和解耦装置等,以确保不当的载荷和运动不会传递到样品上。

测试与控制部分测量精度很大程度上取决于试验的夹具、固定装置、测量系统以及激振器控制策略。为了符合 4.6 提出的容差要求,应细心设计试验的设置,合理安装夹具与传感器,以使控制器具有较高的控制能力和控制稳定性。

3.3 振动控制系统

3.3.1 概述

振动控制系统应具备多个试验目标谱的控制能力。控制通道与监测通道应满足试验要求。

振动控制系统应为具有控制多个激振器激励的振动试验系统,既可控制多激振器单轴振动试验系统,也可控制多激振器多轴施加不同试验目标谱的振动试验系统。控制系统应能实现闭环控制,在试验期间持续修正驱动信号,提高试验精度。控制器应具有同时进行控制和分析、测试通道与控制通道同步采样以及连续数据记录等功能。以下是多激励振动试验控制系统的其他要求:

- a) 从样品、试验系统或运行数据得到相位、相干、互谱密度和其他控制参数;
- b) 实现规定运动和抑制多余的交叉耦合运动,这包括交叉耦合补偿的物理方法或控制算法,及用自适应特征分析技术处理非线性效果时的预试验。

3.3.2 控制谱

多激振器振动试验系统的控制一般通过控制矩阵形式(规定自谱密度、相位、偏相干和规定互谱密度)达到的。矩阵的对角线元素是控制信号的自谱密度,非对角线元素是互谱密度。控制系统既可使用预存的互谱数据,也可使用实验室得到的互谱数据。

3.3.3 控制位置

多激励振动试验控制点的位置通常取在连接部位、某些重要部件所处的位置、提供现场试验数据的测点位置、需要施加限制的端部位置或者结构的承载点。必要时,应规定其他位置的限制谱。为了满足试验目的,根据所获取的信息来选择试验规范中的控制策略。最优的控制策略取决于已有的现场振动数据,或者将被采集的符合试验大纲要求的振动数据。试验和控制策略、控制点和交叉耦合信息的需求将会影响外场数据采集要求。

3.3.4 控制限制

振动控制限制用谱型、幅值、偏相干和相位的形式或互谱密度来设置。振动控制采用谱型和幅值控制限制来实现。

除了试验轴向的规定以外,也要求规定正交轴控制限制。当规定用偏相干与相位和互谱密度时,就需要确定试验的最佳控制限制。

3.3.5 互谱数据

相位、偏相干和互谱密度规范化对试验和分析有重要意义。如果不能提供产品使用的数据,互相关系数应通过实验室试验得到。如果缺乏产品的使用数据,实验室得到的数据就会和产品的使用数据存

在差异。因而,制定试验规范时,要比较两套数据,若差别很大,应作详细分析。

推荐将两种不同配置的结构之间的相干、相位和互谱密度进行比较,并据此作出判断是否要规定偏相干和相位,或者将该项分别定义为 1 和 0。显然,需要对产品的使用数据和前期试验数据进行比较。另一种方法是使用实验室试验配置的相干、相位和互谱密度,这再一次表明前期试验的重要性。

在交叉耦合矩阵求逆时,一般宜进行优化。如果试验工程师有能力做到这一点,那么在规定重要参数和优化所采取的控制策略时,能提高作出判断的能力。

3.4 振动测量系统

3.4.1 概述

一般情况下,需要测量样品上确定点的加速度以满足试验规范。需要确保试验所测得的加速度信息与现场测得的加速度信息相对应,并用于确定多输入多输出试验的需求。这就要求安装在样品上的加速度传感器位置应和现场测量样品上的位置相同。在多自由度的情况下,仪器通道间的相位和极性成为关键的试验参数,为了保持相位精度要求,建议使用相同的采样 A/D 转换器。建议实验室和现场的数据采集仪器与控制器采用相同数据格式,否则在开始试验之前可能需要对参考数据进行预处理。

3.4.2 振动测量仪

振动测量仪应能满足测量、记录、处理和分析振动测量点振动响应的要求,还应满足以下条件:

- a) 测量通道数量应能满足测量要求;
- b) 连续记录数据;
- c) 同步采样,通道间相位差不大于 0.5° ;
- d) 使用与控制器相同的采样频率,能实现与控制器的同步采样;
- e) 一般应包含时域、FFT、自谱密度、互谱密度、相干、相位、频率响应等分析功能。

3.4.3 加速度传感器

加速度传感器应满足以下要求:

- a) 横向灵敏度不大于 5%;
- b) 幅值的线性度在 3% 以内;
- c) 在测量频率范围内,频率响应幅值精度在 $\pm 5\%$ 以内;
- d) 有足够的灵敏度以确保控制响应间的相对相位准确可靠;
- e) 若需要,为传感器配备合理的调理放大器。

4 试验方法与条件

4.1 选择振动试验方法

通常,与单激励试验方法相比,多激励振动试验方法可以将激振能量更好地分布到样品上,并能最大限度降低边界条件的影响。下面列出的虽不是所有的情况,但在所列情况下,多激励振动试验方法能够更好实现再现效果。

- a) 疲劳、裂纹和断裂对多轴激励更加敏感;
- b) 零件的部件变形,尤其是凸出零件;
- c) 密封与连接处的松动;
- d) 部件的移位;
- e) 表面的磨损;

- f) 电气元件的接触、短路或者老化；
- g) 设备组件错位(比如光学组件)。

4.2 选择试验方法

多激励振动试验可使用不同的设备配置,以适用于许多实际应用过程。试验过程一般可分成以下四种类型。这仅提供了试验过程的基本选择。这一列表不能覆盖所有设备或试验配置。在 6.2 试验程序中较详细地描述所有试验类型。

- 方法 1:多输入单输出(MISO)振动试验；
- 方法 2:多输入多输出(MIMO)振动试验；
- 方法 3:多激励单轴(MESA)振动试验；
- 方法 4:多激励多轴(MEMA)振动试验。

4.3 确定试验方案

4.3.1 控制定义

振动试验控制策略,取决于所能提供的振动测试数据,以达到振动试验的目的。当能够提供独立的自谱密度、偏相干、相位和互谱密度时,就可能采用多激振器控制策略。当不能提供偏相干、相位和互谱密度时,振动试验时有必要首先采用单轴目标谱控制策略。在某些情况下,需要在其正交轴施加界限控制,以便保护激振器。限制控制也需要外场谱包络。典型的试验和控制策略包括:

- a) 单一谱:根据运行数据或规范确定；
- b) 多个自谱密度:根据运行数据或相关规范确定；
- c) 多个自谱密度和偏相干:根据运行数据或实验室试验配置数据确定；
- d) 多个自谱密度和相位:根据运行数据或实验室配置数据确定；
- e) 多个自谱密度、偏向干和相位:根据运行数据或实验室配置数据确定；
- f) 多个自谱密度、偏相干、相位和其他位置的自谱密度:根据运行数据或实验室配置数据确定；
- g) 多个自谱密度、互谱密度和其他相关参数:根据运行数据或实验室配置数据确定；
- h) 控制限制同时采用基于运行数据的量级与包络。

4.3.2 控制方法

试验方法的选择受控于许多因素,包括外场振动环境和产品类型。多激振器试验的控制功能包括:

- a) 正弦:同一正弦和量级;多个正弦分量和相位,可变方向的量级和相位。
- b) 随机:多激振器、单轴和单个控制目标谱;多激振器、多轴和多个控制目标谱;可控制相干和相位差。

4.3.3 试验方案

较复杂结构或新产品的第一次试验应编写试验方案,试验方案一般包括:

- a) 试验设备的选取,根据样品基本参数和试验要求合理选择试验设备；
- b) 试验夹具方案,根据样品基本参数和试验要求和已选取的试验设备进行设计,试验夹具应满足试验要求；
- c) 控制方案,根据的结构特点及夹具方案初步确定控制方式；
- d) 试验安装,根据试验情况、试验场所的大小和试验设备的具体情况制定完整的试验安装方案。

4.4 确定试验条件

4.4.1 概述

通常,多激励振动试验需要根据样品工作现场振动响应的测量数据来确定试验条件。因此,需要获

得充分的现场数据来描述多激励振动试验的试验条件和工作状态。这些数据一般为时间历程,如需功率谱需要将测量数据进行自功率谱和互功率谱密度估计以确定试验条件。当然,当现场数据不充分时,多激励试验过程可能通过对样品的理论分析和实验室测量数据来确定试验条件。

对于时域再现多激励试验需要现场测试数据,没有现场测试数据无法确定实验控制与现场数据的相关性。

一般情况下,由于阻抗和边界条件的影响,总会存在现场环境和实验室环境的差异。这种差异可能需要进一步分析,以确定该差异是否显著到影响了试验的结果。

4.4.2 现场数据充分

当进行多激励振动试验时,试验规范需要规定的基本参数如下:

- a) 频率范围、采样频率、容差、功率谱密度(谱型和频率值)、交叉耦合与误差最小化、偏相干、相位;
- b) 温度、湿度、气压、电磁场等;
- c) 夹具性能、阻抗、模态数据、刚体的模态、现场数据与实验室数据的差异。

当进行多激励振动试验时,一般需要预试验。在正式试验之前,有必要通过迭代获得一个可接受的控制解决方案,以优化控制谱。这需要通过模态分析,对样品和夹具结构响应有一个基本的了解。可以进行必要的在线试验模态测试与分析,评估在试验量级条件下的非线性效应,以准确评估夹具动态特性。

4.4.3 现场数据不充分

如果无法获得充分的现场数据,则通过通用试验标准数据、模态分析数据、样品安装在试验夹具上的实验测试数据综合确定。实验室测试可以用来估计响应点间的相位和相关关系。模态测试可用来验证实际安装条件下和试验夹具安装条件下动态响应的相似性。也可从相似的产品估计,或根据样品的特性和参考相关环境条件标准中确定数据。

4.5 样品安装

样品可以是部件、组件和设备,因此安装过程需考虑以下因素:

- a) 样品的连接件应尽可能与实际情况一致,包括减振器、紧固件、扭矩等;
- b) 所有连接,如电缆、管道等,应合理安装,使其产生的应力与应变类似于现场条件;
- c) 可用低频支撑、悬挂方式可避免复杂的共振;
- d) 需通过补偿或适当的模拟来减小重力与负载和方向的影响。

4.6 试验容差

4.6.1 正常试验容差

除非在环境试验规范中另有说明,否则控制信号应满足以下规定的容差要求:

- a) 正弦振动时试验容差如下:
 - 1) 振幅:在指定频率范围时,参考点处的容差要求为规定值的 $\pm 10\%$ 。当控制策略为多点控制时,每个控制点的响应值应在规定值的5 dB以内。应尽量减少指定频率范围外的激励。
 - 2) 频率:规定值的0.5%或0.5 Hz,取较大值。
 - 3) 扫频速率:不超过规定扫频速率的 $\pm 10\%$,如果未指定扫频速率,则按1 oct/min进行扫频。

- 4) 信号容差:信号容差应不超过 5%。达到 5 000 Hz 或 5 倍于驱动频率,取较小值。

$$T = \left(\frac{NF}{F} - 1 \right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

T ——信号容差;

NF ——未滤波信号的 rms 值;

F ——滤波信号的 rms 值。

注:这个参数适用的信号可以是加速度、速度和位移。

表 1 正弦振动试验容差要求

项目	容差要求	其他条件
幅值	±10%	已指定频率段和方向
	5 dB (各响应值)	多点控制
频率	0.5% 或 0.5 Hz	取最大值
扫频速率	±10%	扫频速率默认为 1 oct/min
信号容差	≤5%	取较小值

- b) 宽带随机振动试验容差如下:

- 1) 功率谱密度(PSD):参考点处的容差要求为规定值的±3 dB 以内。当控制策略为多点控制时,每个控制点的响应值应在规定值的 5 dB 以内。应尽量减少试验频率范围外的激励。随机统计误差应不超过 14%,相当于带宽与采样时间值的乘积($B \times T$)的 50 倍,或相当于自由度为 100。
- 2) 均方根(rms):在试验频率范围内,参考点处的测量值应在设定值的±1 dB 以内。
- 3) 幅值分布:随机振动的瞬时值是名义上的高斯函数。这个分布应该包含了 2.7 倍标准差,而大于 3 倍标准差的概率应该保持在最小值。
- 4) 试验频率范围外的响应:试验设备和夹具不应使驱动信号失真,在一定程度上会导致试验频率范围外的响应发生。在试验频率范围内,最好预先使用上面列出的正弦部分的标准对信号容差进行分析。如果没有进行这种核查,那么在使用下列标准的情况下,试验频率范围内的响应不应超过 20%:

$$R_{out} = \left(\frac{GF}{G} - 1 \right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

R_{out} ——试验频率范围外的响应;

GF ——试验随机波形的 rms 值,达到 5 000 Hz 或 5 倍于驱动频率,取较小值;

G ——试验频率范围内随机波形的 rms 值。

注:这个参数适用的信号可以是加速度、速度和位移。

- c) 试验持续时间容差是在指定时间的 2% 或 1 min 之内,取较小值。

4.6.2 放宽试验容差

在指定试验频率范围内的特定频率下,当使用控制策略时,上面引用的试验容差可能难以实现。在这种情况下,根据试验工程师的判断,在下列约束条件下,某些试验容差要求可能会被降低。其他容差不变。下列试验容差的使用应记录在试验报告中:

- a) 正弦振动:

- 1) 振幅:不大于 500 Hz,规定值的 $\pm 10\%$;
 - 2) 振幅:大于 500 Hz,规定值的 $\pm 20\%$;
 - 3) 振幅超出规定值 $\pm 10\%$ 范围的,其累积频带宽度不应超过试验频率的 5%。
- b) 随机振动:
- 1) 振幅:不大于 500 Hz, ± 3 dB;
 - 2) 振幅:大于 500 Hz, ± 6 dB;
 - 3) 振幅超出规定值 ± 3 dB 范围的,其累积频带宽度不应超过试验频率的 5%;
 - 4) 均方根: ± 2 dB。

当结构复杂时可适当放宽要求,但超容差时应记录,并体现在报告中。

5 信息要求

5.1 概述

为了充分地进行并记录动态性能试验需要至少提供以下信息。根据实际情况设计计划表,必要时可以通过添加或去除部分项目进行调整。建议进行夹具和样品的模态分析检测。这些数据有利于评估试验结果和评估产品对需求变化或新应用的适应能力。这些数据对强调现有产品新的应用领域的未来规划将是非常有价值的(当由于试验程序不考虑模态检测时,共振搜索可以提供非常有用的信息)。

5.2 试验前需要的信息

为了顺利开展多点激励振动试验需要提供以下信息。

- a) 选择试验过程和试验系统(试验项目/平台配置),详细的信息包括:
 - 1) 试验参考条件,时间历程或功率谱和相关系数;
 - 2) 控制传感器安装位置;
 - 3) 监测/限制传感器安装位置(如果有的话);
 - 4) 可以接受的实现激振器系统适当补偿的预试验量级;
 - 5) 试验容差标准,包括先前确定的多点激励试验容差范围;
 - 6) 振动控制策略。
- b) 试验的环境要求,如温度、湿度、电磁场等;
- c) 样品的失效准则及检测方法;
- d) 试验夹具模态测量的有关信息;
- e) 试验中断程序。

5.3 试验中需要的信息

在试验过程中应收集以下信息:

- a) 试验调试记录;
- b) 样品的外观和性能的检测记录;
- c) 试验过程的分析和讨论记录;
- d) 附加环境条件如温度记录;
- e) 与控制测量点有关的任何超出容差情况记录;
- f) 试验中断、试验故障及试验故障处理的记录;
- g) 以数字形式给出的经过适当处理的监测/限制时间历程信息;
- h) 记录试验次数及试验的持续时间。

5.4 试验后需要的信息

在试验后应记录以下信息：

- a) 试验后样品的外观和性能的检测记录；
- b) 振动测量数据分析和性能检查分析；
- c) 任何数据测量异常，比如，很高的仪器噪声、传感器响应的丢失等；
- d) 试验后测量系统的状态；
- e) 原始试验计划的任何改动；
- f) 试验结论。

6 试验实施

6.1 试验准备

6.1.1 试验前准备

试验开始前，根据有关文件和产品有关信息（包括产品使用的响应分布/运动特性）确定试验程序、样品技术状态、试验量级、试验持续时间、激励方法、激振器的控制方法、激振器的安装布置、失效判据、样品功能（性能）要求、测量仪器要求、试验设备能力及夹具等。此外还需要：

- a) 选择合适的激振器和准备/设计夹具；
- b) 选择合适的多激励试验配置和相关的安装方式；
- c) 选择合适的的数据测量系统（传感器、电缆、调理放大器、记录仪和分析设备等）；
- d) 在没有安装样品前，对振动设备进行预调试，以确认工作正常；
- e) 如需要，进行预试验，确定试验方案的激励方法，控制策略及夹具等；
- f) 保证数据采集仪（振动测量仪）的功能（性能）符合技术要求。

6.1.2 试验前检查

所有的样品需要进行实验室环境下预试验以获取基准数据。进行预试验检测步骤如下：

- a) 检查样品的外观等，并记录结果；
- b) 准备样品，如果需要，按照确定的试验计划设置运行配置；
- c) 检查样品/夹具/激励系统，确保符合样品和试验计划的要求；
- d) 如果可以，按照试验计划进行一次运行检测并记录结果，用于和试验中和试验后的数据进行比较。如果样品未达到期望的效果，需分析原因并重新进行检测。

6.2 试验程序

以下是用于多输入多输出振动试验程序的一般指南，根据是否具有公共平台分为4类。程序1、程序2针对公共平台试验系统，程序3、程序4针对分布式振动加载试验系统。程序可以按照试验计划、控制方法和相关试验信息进行适当剪裁。

a) 程序1——多输入单输出(MISO)振动试验

程序1的步骤如下：

- 1) 对样品进行外观检查和功能性能检测。如发现失效，按6.6.3处理；按6.6.3 b)处理时，替换/修复故障或不工作的元器件或组件后，开始试验。
- 2) 如有要求，进行夹具的模态测试以验证夹具是否满足要求。
- 3) 分析试验条件，确定试验设备能否实现。MISO试验为单一线振动或角振动中的一种；对

于角振动,如果需要,通过几何运动关系将条件转化成激振器的线振动。利用所有与样品动态/几何配置有关的固有信息,包括样品距离运动轴的重心说明、试验夹具的模式特性以及所有相关的质量惯性矩,分析试验系统的可行性。包括频率范围、系统抗倾覆能力、推力、速度、位移。如果需要,设置各激振器的试验参考谱。

- 4) 在样品/夹具要求位置上安装传感器。作为试验装置,一般振动平台上对应各激振器有加速度传感器。选择用作控制的加速度或位移传感器的位置和极性应与参考信号的一致(参见附录 B)。根据控制策略的要求控制激振器并测量其他需要的数据,对于低于 5 Hz 的试验,一般采用位移控制。控制点量值相等,各个激振器之间的相干系数为 1,相位为 0° 或 180° 。调试测量系统,保证其工作正常。如果需要,确定试验限幅控制点、频率范围和量值,并进行试验控制。
- 5) 选择激振器和对应的控制点,主控制点与激振器唯一对应。一般只选择对运动提供推力的激振器,对同一试验系统上的其他不提供推力的激振器,一般进行最大约束,避免其他运动的牵连影响。
- 6) 按 6.7 的要求进行试验安全保护,一般设置紧急终止试验物理制动。如有需要,专人负责。
- 7) 将产品按寿命期实际使用状态安装在夹具上。如有需要,使用悬挂或软弹性支撑装置平衡样品、夹具在内的运动结构重力,并对样品进行保护。悬挂或支撑的共振频率不大于样品安装在夹具上之后的一阶频率的 $1/5$ 。如有需要,测试样品模态。
- 8) 对样品进行外观检查,如有需要,还要进行功能检测。如果样品的运行正常,则进行步骤 9);如发现失效,按 6.6.3 处理并重复步骤 8)。
- 9) 施加低量级振动,可以使用试验要求满量值的 -18 dB 或 -12 dB。如有需要,还要施加其他环境应力。检查激振器、夹具和测量系统是否符合要求。
- 10) 对样品(或动态模拟件)进行系统传递特性辨识。如可行,采用与试验状态和条件相近的激励施加,如白/随机噪声谱、正弦扫频、定频,以获得更准确的系统传递特性。如果试验系统状态未改变,之前相同试验状态已有的系统传递特性可以调出使用,不再进行系统传递特性辨识。如果使用动态模拟件,补偿后用样品代替模拟样品。
- 11) 施加所要求的振动以及其他要求的环境应力。通常在开始试验时使用小量级激励以保证动态响应的正确和仪器设备的正常,可以是试验要求满量值的 -12 dB(或 -18 dB)。均衡稳定后逐步增加(如 3 dB 一级),直到满量值。
- 12) 记录下必要的的数据,检查每一个控制点的振动(量值、相干和相位)是否符合规定,作为试验评价的依据。频域试验记录包括控制加速度或控制位移的自功率谱和互功率谱密度。
- 13) 在整个试验过程中监测振动量级,如可行,应在试验过程中持续监测样品的性能。如果量级变化或者发生失效,按照试验关机程序终止,然后根据试验中断恢复程序 6.6 进行处理。
- 14) 在达到要求的试验持续时间时,停止振动。根据试验目的可能会要求在结束前进行附加的不同量级的振动。如果这样,根据要求重复步骤 8)~14)。
- 15) 检查样品、夹具、激振器和测量仪器。如果发生失效、磨损、松动或其他异常,按 6.6 试验中断恢复程序进行处理。
- 16) 在每个要求的振动方向上重复步骤 1)~15)。一些具有多自由度运动功能的振动试验设备,可以实现一次安装后进行多振动方向的试验,无需重新安装样品来改变激励方向。重复的步骤可以不做。
- 17) 在每种要求的振动环境上重复步骤 1)~16)。
- 18) 从夹具上卸下样品,对其在试验过程中可能发生的可见机械退化进行检查。如果发生失

效,按 6.6 进行处理。数据处理参见附录 C、附录 B。

注:建议传感器横向灵敏度不大于 3.5%。

b) 程序 2——多输入多输出(MIMO)振动试验

程序 2 的步骤如下:

- 1) 对样品进行外观检查和功能性能检测。如发现失效,按 6.6.3 处理;按 6.6.3 b)处理时,替换修复故障或不工作的元器件或组件后,开始试验。
- 2) 如有要求,进行夹具的模态测试以验证夹具是否满足要求。
- 3) 分析试验条件,确定多输出振动的激励策略。检查 MIMO 试验条件是否可实现。MIMO 试验设备的激振器数量可以大于运动自由度数量(超静定),在多种多输出振动的激励方式中确定一种。超静定激振应对激振器进行约束,确保激励驱动与多输出振动为确定关系(静定系统)。推荐选择提供推力的实现多输出振动最少需要的激振器数量,避免其他运动的牵连影响。
- 4) 分解试验条件到所选择的激振器上,确定试验设备能否实现。当包含刚体转动时,MIMO 试验条件与激振器没有直接对应关系。利用运动转换关系(参见附录 B)把试验条件分解到所选择的激振器上。利用所有与样品动态/几何配置有关的固有信息,包括样品在三个正交轴上的重心说明,试验夹具的模态特性,以及所有相关的质量惯性矩,分析试验系统的可行性,包括频率范围、抗倾覆能力。
- 5) 在样品/夹具要求位置上安装传感器。作为试验装置,一般振动平台上对应各激振器有加速度传感器,选择用作控制的加速度或位移传感器的位置和极性应与参考信号的一致(参见附录 B)。清楚地辨别出各个激励方向并提供校准以保证每个激励方向上的所有的精确性。对于低于 5 Hz 的试验,一般采用位移控制。调试测量系统,保证其工作正常。如果需要,确定试验限幅控制点、频率范围和量值,并进行试验控制。
- 6) 选择激振器和对应的主控制点,主控制点与激振器唯一对应。根据控制策略的要求控制激振器并测量其他需要的数据。一般主控制点使用试验装置振动平台上的加速度或位移传感器,试验条件分解为固定的转换关系。如果需要,选择非试验装置振动平台上的点作为主控制点,试验条件分解的转换关系需要重新确定。
- 7) 按 6.7 的要求进行试验安全保护,一般设置紧急终止试验物理制动。如有需要,专人负责。
- 8) 将产品按寿命周期实际使用状态安装在夹具上。如果需要,使用悬挂或软弹性支撑装置平衡样品、夹具在内的运动结构重力,并对样品进行保护。悬挂或支撑的共振频率不大于样品安装在夹具上之后的一阶频率的 1/5。如有需要,测试样品模态。
- 9) 对样品进行外观检查,如有需要,还要进行功能检测。如果样品的运行正常,则进行步骤 10)。如发现失效,按 6.6.3 处理并重复步骤 9)。
- 10) 施加低量级振动,可以使用试验要求满量值的 -18 dB 或 -12 dB。如有需要,还要施加其他环境应力。检查激振器、夹具和测量系统是否符合要求。
- 11) 对样品(或动态模拟件)进行系统传递特性辨识。如可行,采用与试验状态和条件相近的激励施加,如白/随机噪声谱、正弦扫频、定频,以获得更准确的系统传递特性。如果试验系统状态未改变,之前相同试验状态已有的系统传递特性可以调出使用,不再进行系统传递特性辨识。如果使用动态模拟样品,补偿后用样品代替模拟样品。
- 12) 施加所要求的振动以及其他要求的环境应力。通常在开始试验时使用小量级激励以保证动态响应的正确和仪器设备的正常,可以是试验要求满量值的 -12 dB(或 -18 dB)。均衡稳定后逐步增加(如 3 dB 一级),直到满量值。
- 13) 记录下必要的的数据,检查每一个控制点的振动(量值、相干和相位)是否符合规定,作为试

- 验评价的依据。频域试验记录包括控制加速度或控制位移的自功率谱和互功率谱密度。
- 14) 在整个试验过程中监测振动量级,如可行,应在试验过程中持续监测样品的性能。如果量级变化或者发生失效,按照试验关机程序终止,然后根据试验中断恢复程序 6.6 进行处理。
 - 15) 在达到要求的试验持续时间时,停止振动。根据试验目的,可能会要求在结束前进行附加的不同量级的振动。如果这样,根据要求重复步骤 9)~15)。
 - 16) 检查样品、夹具、激振器和测量仪器。如果发生失效、磨损、松动或其他异常,按 6.6 试验中断恢复程序进行处理。
 - 17) 在每种要求的振动环境上重复步骤 1)~16)。重复的步骤可以不做。
 - 18) 从夹具上卸下样品,对其在试验过程中可能发生的可见机械退化现象检查。如果发生失效,按 6.6 进行处理。数据处理参见附录 C、附录 B。

注:建议传感器横向灵敏度不大于 3.5%。

c) 程序 3——多激励单轴输出(MESA)振动试验

程序 3 的步骤如下:

- 1) 对样品进行外观检查和功能性能检测。如发现失效,按 6.6.3 处理;按 6.6.3 b)处理时,替换修复故障或不工作的元器件或组件后,开始试验。
- 2) 如有要求,进行夹具的模态测试以验证夹具是否满足要求。
- 3) 分析试验条件,MESA 试验为单一线振动或角振动中的一种。对于角振动,如果需要,通过几何运动关系将条件转化成激振器的线振动。根据试验设备的能力进行预处理,并确定补偿方法。
- 4) 根据样品技术状态或要求,选择参数合适的激振器并确定数量。利用所有与样品动态/几何配置有关的固有信息,包括样品距离运动轴的重心说明、试验夹具的模态特性以及所有相关的质量惯性矩,分析试验激励的可行性。
- 5) 在样品/夹具要求的位置上安装传感器。选择用作控制的加速度或位移传感器的位置和极性应与参考信号的一致(参见附录 B)。清楚地辨别出各个激励方向并提供校准以保证每个激励方向上的所有的精确性。调试测量系统,保证其工作正常。
- 6) 选择与激振器对应的主控制点,主控制点与激振器唯一对应。如果需要,一个激振器可以选择多个控制点,并确定控制策略。对于低于 5 Hz 的试验,一般采用位移控制。
- 7) 按 6.7 的要求进行试验安全保护,一般设置紧急终止试验物理制动。如有需要,专人负责。
- 8) 如果需要,确定试验限幅控制测点、频率范围和量值。限幅点位置可根据试验技术文件要求,或根据小量级预试验确定。
- 9) 确定激振位置。根据样品的特点,激励位置应选择刚度较大的部位。尽量接近获取实测数据的部位,易于激振器安装。
- 10) 试验系统搭建。将激振器摆放到位,根据产品按实际使用状态安装。一般对非激励的轴振动进行约束。一般选择机械解耦装置,将激振器与解耦装置、解耦装置与夹具、夹具与样品之间紧固相连。系统搭建需要考虑安装效率,便于试验状态转换。
- 11) 样品采用悬空的激励方式,使用悬挂或软弹性支撑装置平衡包括样品、夹具在内的运动结构重力,并对样品进行保护。悬挂或支撑的共振频率不大于试验下限频率的 1/5。采用非悬空的激励方式,试验系统应满足抗倾覆能力要求。如有要求,测量样品模态。
- 12) 对样品进行外观检查,如有需要,还要进行功能检测。如果样品的运行正常,则进行步骤 13)。如发现失效,按 6.6.2 处理并重复步骤 12)。
- 13) 施加低量级振动,可以使用试验要求满量值的 -18dB 或 -12dB。如有需要,还要施加其

他环境应力。检查激振器、夹具和测量系统是否符合要求。

- 14) 对样品(或动态模拟件)进行系统传递特性辨识。如可行,采用与试验状态和条件相近的激励施加,以获得更准确的系统传递特性。如果使用动态模拟样品,补偿后用样品代替模拟样品。
- 15) 施加所要求的振动以及其他要求的环境应力。通常在开始试验时使用小量级激励以保证动态响应的正确和仪器设备的正常,可以是试验要求满量值的 -12 dB(或 -18 dB)。均衡稳定后逐步增加(如 3 dB一级),直到满量值。
- 16) 记录下必要的的数据,检查每一个控制点的振动(量值、相干和相位)是否符合规定,作为试验评价的依据。频域试验记录包括控制加速度或位移的自功率谱和互功率谱密度。
- 17) 在整个试验过程中监测振动量级,如可行,应在试验过程中持续监测样品的性能。如果量级变化或者发生失效,按照试验关机程序终止,然后根据试验中断恢复程序 6.6 进行处理。
- 18) 在达到要求的试验持续时间时,停止振动。根据试验目的,可能会要求在结束前进行附加的不同量级的振动。如果这样,根据要求重复步骤 12)~18)。
- 19) 检查样品、夹具、激振器和测量仪器。如果发生失效、磨损、松动或其他异常,按 6.6 试验中断恢复程序进行处理。
- 20) 在每个要求的振动方向轴上重复步骤 1)~19)。
- 21) 在每种要求的振动环境上重复步骤 1)~20)。
- 22) 从夹具上卸下样品,对其在试验过程中可能发生的可见机械退化现象检查。如果发生失效,按 6.6 进行处理。数据处理参见附录 C、附录 B。

注:建议传感器横向灵敏度不大于 3.5% 。

d) 程序 4——多激励多轴输出(MEMA)振动试验

程序 4 的步骤如下:

- 1) 对样品进行外观检查和功能性能检测。如发现失效,按 6.6.3 处理;按 6.6.3 b)处理时,替换修复故障或不工作的元器件或组件后,开始试验。
- 2) 如有要求,进行夹具的模态测试以验证夹具是否满足要求。
- 3) 分析试验条件,确定 MEMA 各激励输入的试验条件。频域试验的互谱信息以轴为基准。如果需要,根据试验设备的能力进行预处理,并确定补偿方法。
- 4) 根据要求,选择参数合适的激振器,确定数量和激励方案。利用所有与样品动态/几何配置有关的固有信息,包括样品距离运动轴的重心说明、试验夹具的模态特性以及所有相关的质量惯性矩,分析试验激励的可行性。
- 5) 在样品/夹具要求的位置上,安装传感器。选择用作控制的加速度的位置和极性应与参考信号的一致(参见附录 B),清楚地辨别出各个激励方向并提供校准以保证每个激励方向上的所有的精确性。调试测量系统,保证其工作正常。
- 6) 选择与激振器对应的主控制点,主控制点与激振器唯一对应。如果需要,一个激振器可以选择多个控制点,并确定控制策略。对于低于 5 Hz 的试验,一般采用位移传控制。
- 7) 按 6.7 的要求进行试验安全保护,一般设置紧急终止试验物理制动。如果需要,专人负责。
- 8) 如果需要,确定试验限幅控制测点、频率范围和量值。限幅点位置可根据试验要求,或根据小量级预试验确定。
- 9) 确定激振位置,应考虑空间干涉。根据样品的特点,激励位置应选择刚度较大的部位。尽量接近获取实测数据的部位,易于激振器安装。
- 10) 试验系统搭建。将激振器摆放到位,根据产品按实际使用状态安装。使用高性能的机械

解耦装置,将激振器与解耦装置、解耦装置与夹具、夹具与样品之间紧固相连。如果需要,对解耦装置进行保护。

- 11) 样品采用悬空的激励方式,使用悬挂或软弹性支撑装置平衡包括样品、夹具在内的运动结构重力,并对样品进行保护。悬挂或支撑的共振频率不大于样品安装在夹具上之后的一阶频率的 1/5。
- 12) 对样品进行外观检查,如有需要,还要进行功能检测。如果样品的运行正常,则进行步骤 13)。如发现失效,按 6.6 处理并重复步骤 12)。
- 13) 施加低量级振动,可以使用试验要求满量值的 -18 dB 或 -12 dB。如有要求,还要施加其他环境应力。检查激振器、夹具和测量系统是否符合要求。
- 14) 对样品(或动态模拟件)进行系统传递特性辨识。如可行,采用与试验状态和条件相近的激励施加,以获得更准确的系统传递特性。如果使用动态模拟样品,补偿后用样品代替模拟样品。
- 15) 施加所要求的振动以及其他要求的环境应力。通常在开始试验时使用小量级激励以保证动态响应的正确和仪器设备的正常,可以是试验要求满量值的 -12 dB(或 -18 dB)。均衡稳定后逐步增加(如 3 dB 一级),直到满量值。
- 16) 记录下必要的的数据,检查每一个控制点的振动(量值、相干和相位)是否符合规定,作为试验评价的依据。频域试验记录包括控制加速度或位移的自功率谱和互功率谱密度。
- 17) 在整个试验过程中监测振动量级,如可行,应在试验过程中持续监测样品的性能。如果量级变化或者发生失效,按照试验关机程序终止。确定量级变化原因,然后根据试验中断恢复程序 6.6 进行处理。
- 18) 在达到要求的试验持续时间时,停止振动。根据试验目的,可能会要求在结束前进行附加的不同量级的振动。如果这样,根据要求重复步骤 12)~18)。
- 19) 检查样品、夹具、激振器和测量仪器。如果发生失效、磨损、松动或其他异常,按 6.6 试验中断恢复程序进行处理。
- 20) 在每种要求的振动环境上重复步骤 1)~19)。
- 21) 从夹具上卸下样品,对其在试验过程中可能发生的可见的机械退化现象检查。如果发生失效,按 6.6 进行处理。数据处理参见附录 C、附录 B。

注:建议传感器横向灵敏度不大于 3.5%。

6.3 中间检测

如有关规范有规定,在试验过程中样品应在规定的时间间隔内进行中间检测,并检测其性能。

有时样品在试验全过程或试验的适当阶段处于工作状态。

对于振动会影响开关功能的样品,比如干扰继电器的工作,重复操作以确认在试验频率范围内产品的功能是否正常。

如果试验仅仅为了验证完整性,样品的功能可在试验完成后进行评价。

6.4 恢复

有时在试验后和最终检测前需要一段恢复时间让样品达到与初始检测时相同的条件,例如温度。有关规范应规定需要恢复的条件。

6.5 最终检测

应按有关规范规定对样品进行外观、尺寸和功能性能检测。

有关规范应给出样品可接受或拒收的判据。

6.6 中断

6.6.1 概述

多种情况都可能导致试验中断。下面将讨论常见的导致试验中断的原因,以及推荐的解决办法。建议在任何试验中断的过程中只要激励装置还处于通电状态都仍开启试验记录设备。

6.6.2 由于试验设备故障导致中断

如果中断是由于试验设备故障,则应分析该故障并判断出根本原因。同时建议对控制和响应的数据进行评估,确保在试验设备发生故障的过程中没有不希望的瞬态力传递给样品。如果样品未受由于试验设备故障产生的过试验影响,修复试验设备或更换试验设备从中断位置重新开始试验。如果样品受试验设备故障产生的过试验的影响,则立即通知对样品负责的试验工程师。根据过试验事件的量级和持续时间、事件的频谱数据、试验资源的成本和可行性以及试验具体问题的分析等因素进行风险评估,以确定下一步解决办法。

6.6.3 由于样品运行失效导致中断

若样品在运行过程中发生了功能失效,则应中断试验,分析失效原因。根据具体情况,按以下方法重新开始试验:

- a) 最好选择一个“新”样品代替原来的样品并重新开始整个试验。
- b) 另一种方法是替换/修复故障的元件或组件,并重新开始整个试验。在继续试验之前需进行风险分析,因为除了新替换的元件外这个选项对整个样品增加了一个过试验条件。如果故障的元件或组件是一个可更换单元,且寿命小于试验时间的话,则需要在实际试验中替换可更换单元,并从中断点继续试验。
- c) 对于许多系统级的试验,样品或者费用昂贵或者具有唯一性,因此由于单个子系统失效而要获得额外的样品重新进行试验是不可能的。对于这样的情况,应对对试验系统负责的机构进行风险评估,以决定替换故障的子系统并重新进行试验是否是一个可以接受的方案。如果可以,则应替换故障的子系统后重新开始整个试验。

注:当评估由于样品故障引起的中断时,可考虑对相同样品进行预试验,并分析其结果。

6.6.4 由于计划事件导致中断

很多情况下会发生计划中的试验中断,例如,样品的停机检测、定期维护等。在完成计划要求的工作后继续试验。所有预先安排的中断都需要记录在试验计划和试验报告中。

6.6.5 超过试验容差导致中断

超过试验容差或在动态响应中出现了显著的变化都可能导致试验工程师启动试验中断,或当试验容差超过控制策略中而产生自动中断。在这种情况下,检查样品,夹具和试验设备,排查出原因:

- a) 如果是由于夹具或试验设备的问题导致中断,修正问题后即可恢复试验;
- b) 如果是由于样品的结构或机械退化导致中断,则该问题一般会导致试验失败,除非这问题允许在试验过程中纠正,才可以重新试验。

6.7 试验安全保护措施

对于大部分系统级试验,样品昂贵或者具有唯一性,因此试验系统的安全保护措施非常重要,应在试验过程中进行安全保护,尽量避免样品因为外部的异常情况而受损或失效。

试验过程中,控制系统应具有快速响应停止的能力,一旦试验过程中发现异常后,能人为地快速控制试验的停止,以免样品遭受更加严重的破坏。

试验过程中,控制系统应具有激励电压限制功能,保证在试验过程中激励电压在安全限制范围之内。避免激励电压过大导致样品损坏或失效。

试验过程中,控制系统应具有信号监测功能,若采集到的信号量级比目标量级明显异常偏小或者明显偏大的情况下,能报警或中断,使试验系统各个测点的量级都处于可控的状态。

7 结果分析

试验期间,按要求自动存储试验运行数据。控制软件应当能提供如下基本信号处理功能:传递函数、阻抗矩阵、自谱、偏相干、互谱和相位。也可能需要使用后处理工具作附加数据处理。

8 有关规范应给出的内容

当有关规范中采用本试验时,只要适用,应尽可能给出下列细节,要特别注意带星号(*)的条款,因为这些条目总是必需的。项目如下:

- a) 初始振动响应检查,方法 1(正弦或随机激励);
- b) 使用正弦或随机激励的振动响应检查,方法 2*;
- c) 最终振动响应检查,方法 1 和方法 2;
- d) 固定点*;
- e) 横向运动;
- f) 峰值因子或驱动信号削波*;
- g) 振动容差;
- h) 允许偏差(方法 2)*;
- i) 安装;
- j) 试验频率范围*;
- k) 加速度谱密度值*;
- l) 加速度谱密度谱型*;
- m) 试验时间*;
- n) 预处理;
- o) 初始检测*;
- p) 方法 1 或方法 2*;
- q) 多点控制;
- r) 试验轴向和试验顺序;
- s) 响应点,方法 2;
- t) 加速度谱密度的多次测量;
- u) 中间检测;
- v) 恢复;
- w) 最终检测和接受或拒收的判据*。

9 试验报告应给出的信息

试验期间应做记录,内容应包括如带试验参数的试验运行记录的时间列表,试验期间观察及实施情

况和测量数据表。试验报告至少应给出下列信息：

- a) 客户(名称和地址)；
- b) 实验室(名称和地址)；
- c) 试验报告标识(发布日期、唯一编号)；
- d) 试验日期；
- e) 试验类别；
- f) 试验目的(研制试验、鉴定试验等)；
- g) 试验标准名称及版本号(相关的试验程序)；
- h) 样品描述(唯一性标识、图纸、照片、数量等)；
- i) 样品的安装方式(夹具标识, 图纸, 照片等)；
- j) 试验设备描述(横向运动等)；
- k) 控制和测量系统、传感器安置位置(描述、图纸、照片等)；
- l) 所用的滤波器(滤波器的类型和带宽)；
- m) 测量系统不确定度(校准数据, 上次校准日期和下次校准日期)；
- n) 控制策略[多点控制, 多参考控制(加速度、位移或者力控制), 最小或最大控制策略]；
- o) 初始, 中间, 中断或最终检查；
- p) 要求的严酷等级(根据试验规范)；
- q) 文件中规定的试验严酷等级(检测点, 试验谱)；
- r) 试验结果(样品状态的评价)；
- s) 试验情况记录；
- t) 试验结论；
- u) 试验负责人(签名)；
- v) 发放(报告发放清单)。

注：试验记录可作为试验报告的一部分。

附 录 A
(资料性附录)
多激励振动试验夹具

A.1 概述

A.1.1 范围

本附录讨论了在实验室进行多激励振动环境模拟时与夹具的使用相关的内容,给出了样品安装有关信息(带包装或不带包装),还给出了多激励振动环境与气候环境综合施加时的有关信息。本附录给出和讨论了一些关键的特性,对于能否进行合格的试验非常重要。

A.1.2 目的

进行多激励振动环境试验时需要使用试验机和夹具,将载荷施加到样品上以复现使用时的情况。应以受控的方式通过电动振动台或伺服作动器施加载荷或振动。

试验夹具的选择对于能否成功进行试验非常重要。好的试验夹具根据样品不同,在尺寸和复杂程度上区别很大。多数情况下,基于实际情况和过去的经验,会有一个预定的选择。可以使用在类似试验中使用过的夹具,也可以用已有的有效设计加工新夹具。如果没有现成试验夹具或夹具,就需要重新进行设计。

A.1.3 主要内容

振动试验装置可以是直接连接到作动器上的简单系统,也可以是需要专用的夹具和支撑夹具的复杂系统。

在进行夹具设计前应考虑下列问题:

- a) 试验对象:整个产品或部件。如果是部件,应充分复现界面的载荷情况。无论是将部件单独试验还是作为整个产品的一部分进行试验,夹具都应充分复现产品或部件在使用时的动态响应。
- b) 施加机械载荷的位置:如果样品是主要的承载部件,应在试验时对其进行控制,并将载荷直接施加到样品上。如果样品受振动运动的影响,应考虑它是传递还是响应振动。如果是传递,载荷应通过正常安装点直接施加到样品上,如果是响应,就需要更加细致地连接布局。
- c) 载荷点数量和方向:应能明确载荷施加的位置、数量和方向。
- d) 载荷和运动的幅值:对于每种载荷组成和运动轴向,需识别出载荷的最大值,运动的最大值。作动器应有足够的能力以产生使用时的载荷,提供足够的位移来产生需要的运动。应有一定的间隙,以适应试验时惯性效应和载荷作用下样品的变形。

A.2 试验夹具

A.2.1 通用要求

A.2.1.1 作用

夹具用于将激振器与样品连接起来,通过连接点向样品施加激励。试验夹具首先要具备连接和定向的功能,任何夹具都应当将激振器的运动通过连接点真实地传递到样品上。

A.2.1.2 考虑共振

理想情况下振动夹具的设计应当是将激振器和样品连接在一起后,在试验频率范围内没有共振。否则通过激振器向样品传递运动的真实性就会受到影响,应通过阻尼器来降低夹具的共振幅值。然而,这是很难实现的,有时需依赖控制系统来减少夹具/工装的共振效应。存在一种趋势:就是依赖控制器的能力来补偿夹具设计的不足。但不推荐采用这种做法,只有在所有改进夹具特性的设计方法都尝试不成功后再采用。

A.2.2 单轴多点

单轴多点试验系统由沿着平行方向运动的多个激振器组成。例如并激电动振动台、轮式车辆试验用的四柱激振器(在整车每个轮子底下安装垂直运动的激振器来模拟路面载荷),以及用多个激振器向机翼施加气动载荷的试验系统。样品可能是固定的(例如机翼试验),也可能是自由的(如轮式车辆)。

A.2.3 多轴单点

多轴单点试验系统由多个沿着正交轴向直线运动的激振器通过样品上的一个点施加激励。用于模拟通过样品上的一个点施加多轴载荷的情况。例如车轮、直升机旋翼顶端的连接点。多轴试验系统需要在每个方向上有柔性关节以防止正交轴向上运动受到限制。一个轴向上运动的激振器可能会在其他正交轴向上引起耦合运动。

A.2.4 多轴多点

多轴多点试验系统用于多个激振器在多个方向上对样品多个位置同时加载的情况。尽管不多见,还是存在样品通过不同的位置承受多轴激励的情况。

A.2.5 材料和特性

A.2.5.1 材料

设计夹具时,材料的选择主要考虑质量和刚度。材料的刚度是其物理特性的函数,刚度从金属到塑料变化范围很大。某些材料具有良好的比刚度,即同样的质量会提供更大的刚度,通常希望这样,一些常规的材料如镁和铝因其良好的比刚度而被广泛使用。材料的另一个性能是阻尼特性,例如铝的迟滞阻尼大约是钢材的四倍,塑料的阻尼甚至比铝还要大。材料的选择需仔细考虑,例如用铝替代钢可以降低重量,动态特性不会变化多少,而用另一些材料例如塑料时,为满足刚度要求就需要改变尺寸,这样就会明显改变夹具的动态特性。

A.2.5.2 夹具设计的基本要求

设计夹具时应考虑指标如下:

- a) 强度:夹具的强度应足以传递需要从激振器向样品施加的载荷。
- b) 刚度:夹具的刚度应足够高,使其不发生变形,不改变施加到样品上载荷的特性。质量相同刚度越大则一阶固有频率越高,应高于激励频率范围。
- c) 质量:夹具的质量在满足刚度要求的情况下应尽可能小。夹具在运动中会产生惯性载荷,在评估激振器能力时需考虑在内。惯性载荷不应作用在样品上,否则会影响其动态特性。
- d) 固有频率:夹具的固有频率应高于样品的试验频率范围,否则将改变样品的动态特性,难以得到令人满意的模拟。
- e) 阻尼:如果在试验频率范围内出现高 Q 值的共振,就可能需要采用加大阻尼的方法。大多数

金属的材料阻尼对其动态特性影响不大。连接界面的阻尼实际上影响更大。在共振区加装阻尼材料或用聚氨酯发泡或类似材料填充夹具的空隙可作为增加阻尼的设计方法。加装分立阻尼器,阻尼涂层或吸能器也可作为增加阻尼的方法。

- f) 固定:夹具应采用与现场使用相同的方法固定样品,这对于多轴振动的情况尤为重要,因为样品以复杂的方式运动,在设计固定方式时需能允许这种运动。
- g) 样品的动态响应:夹具应不改变样品在使用条件下的动态特性,否则可能引入不真实的失效模式。当然不是总能满足这种要求,进行夹具设计时要尽可能减小其对样品动态响应特性的影响。
- h) 寿命:夹具需具有足够的疲劳强度,抗磨损能力,足以保证试验的完成而不出现失效。

A.2.6 设计和加工

A.2.6.1 基本用途

试验夹具的基本用途是向样品传递规定的动力学环境,保证在控制点上满足规范的要求。

A.2.6.2 影响因素

样品的物理性状和质量、试验要求的严酷度和试验设备的能力会影响夹具的设计。后两个因素取决于要进行的试验。

A.2.6.3 有限元建模

夹具设计过程中可能要用到有限元建模技术。对于简单夹具,建模时可用质量、弹簧和阻尼的集总系统方法进行模拟。

A.2.6.4 模态分析

通过作动器或激振器进行预试验,最好用具有代表性动态特性的样品进行,这一点很关键。对于复杂夹具可用模态分析来评估夹具设计的可用性。

A.2.6.5 激振器

激振器的推力是限制样品和夹具总质量的关键参数。生产商通常会规定一个激振器在给定频率范围内所允许的最大质量和严酷度,试验夹具应基于激振器的能力进行设计。

A.2.6.6 严酷度

关于严酷度,最重要的参数是频率范围、位移或加速度要求。当然就激振器性能而言,大推力和宽频率范围是矛盾的。因而,选用最大能力的激振器有时并不一定恰当。振动的夹具设计一般来说比强度试验的夹具设计更复杂。想要得到满意的结果需要丰富的设计经验。当夹具和样品固定到激振器后,其频响特性可能会发生变化,而且要注意动态质量的影响要比静态质量影响更大。

A.2.6.7 加工方法

进行夹具设计时有多种加工方法,包括螺栓连接、铆接、焊接、铸造和粘接等。选择何种加工方法取决于要满足的规范要求和所选用的材料。试验夹具应尽可能简单。要注意到铆接和螺接的方法可能达不到焊接或铸造的刚度。试验频率高时,不应当采用铆接结构,尽可能避免螺接结构。由于铝具有成本低,加工容易,内部阻尼较高等特点而被经常采用。

A.2.6.8 界面要求

所有界面应尽可能平整光滑以提供良好的机械接触,特别是要进行的试验频率超过 500 Hz 的情况。连接孔的个数应与需要的刚度和连接要求一致。使用螺纹孔时如果材料的强度低或存在磨损的可能,对于铝合金等较软的基材推荐加装不锈钢衬套。如有可能,试验夹具的设计应标准化,以便适用于不同的样品。

A.2.6.9 组装

进行组装时应避免出现夹具或样品的变形。如可行,所有的螺栓应按合理的次序使用最大允许扭矩进行固定。对于持续时间长的试验,样品与夹具间和夹具与激振器间的螺栓应根据要求定期检查和紧固。

A.2.6.10 重心

振动试验中夹具/样品组合体的重心应与激振器运动部件的中心线重合,与运动方向垂直。有些情况下无法保证夹具和样品的重心与激振器的运动轴线重合,此时会产生倾覆力矩。夹具的设计应使得倾覆力矩尽可能小。如果要求进行多个正交轴向上的试验,常常需要使用水平滑台,此时夹具和样品组合的中心应尽可能低。

A.2.6.11 加速度计安装

为保证试验的正确实施,设计夹具时应考虑加速度计安装位置的连接。加速度计的安装方式有多种,通常建议采用螺接的方式。在进行振动试验,特别是在进行预试验时,有时会需要安装额外的加速度计以便检查夹具和样品的动态特性。

A.2.7 大型负载的辅助支撑

A.2.7.1 静态载荷

如果样品较重,可能需要用一些辅助设施来支撑样品的静态载荷。电动振动台可能需要在水平和垂直两个方向都对静载进行支撑,而液压作动筒一般只需要在水平方向进行支撑。在垂直方向通常用一个软弹簧与激振器的活动部分串联起来提供支撑,弹簧可以是位于地基和激振器活动部件另一个自由端之间的空气弹簧,也可以是从顶部支撑结构(龙门架)上通过弹性吊缆将样品进行悬挂。在水平方向,可以用水平滑台、空气弹簧、顶部支撑结构作为支撑。

A.2.7.2 运动轴向

任何支撑或连接装置都不能在与运动轴向垂直的轴向上引入多余的运动。为避免在激振器运动轴向之外的轴向上激发出多余的振动,所有支撑系统(除了水平滑台)的重心都要在振动发生器的运动轴线上。在运动轴向之外的轴向上的多余运动可能导致试验要求无法得到满足,在极端情况下还可能导致损坏激振器。

A.2.7.3 低频振动

支撑或悬挂样品用的空气弹簧或弹性吊缆会在低频段引入样品的刚体共振(一般低于 5 Hz)。所以,无论是主振轴向还是其他轴向,都需特别注意避免在这个低频段施加过度的振动。当振动激励器安装在低频支撑结构上时也要同样注意。对于含有非常低频成分的振动,应注意避免造成激振系统(含空气弹簧或试验夹具)共振,否则会造成:

- a) 试验的运动与试验要求不一致。
- b) 大量振动推力被吸收难以满足试验要求。
- c) 在激振器上产生不可接受的反作用力。

A.3 试验夹具的验证

A.3.1 试验前检查

试验前有必要对夹具和样品进行检查,以确保试验可控并满足环境试验规范的所有要求。可以通过下列方法进行检查:

- a) 进行预试验,即夹具在不加载和加载的条件下经受规定的振动。加载可以用动力学相似的模拟件,如果可行也可用真实样品。
- b) 夹具安装样品后进行低量级试验。
- c) 夹具安装样品后进行满量级试验。
- d) 试验夹具安装样品后的试验或理论的模态/有限元分析,并根据模态或有限元分析结果进行试验规范的仿真。如果整个过程都只是通过模态分析来完成的,那么试验夹具一般都要进行验证。

A.3.2 预试验结果

预试验的结果应表明夹具在规定的频率范围内没有共振,或即使在规定的频率范围内存在共振,在控制点也可以产生规定的运动要求。预试验结果同时要表明夹具可以精确地再现要求的运动,没有扭转并使其他轴向上的运动尽可能小。关键是要表明通过夹具可以把使用期内可能出现的潜在故障模式再现出来,并且不引入其他不期望的故障模式。通常通过在所有的振动量级上将样品使用期的动态特性与试验中的模态特性进行匹配。

A.3.3 动态响应

对于复杂样件,有时应检查安装在夹具上的样件的动态响应能否充分复现使用期的产品的动态响应。需要在一定数量的位置上,在使用状态和试验状态下进行频率响应测量。

A.3.4 模态分析

进行多激励振动试验时,预试验尤为重要。此阶段需要不断反复,直至得到可接受的控制方案,将控制谱优化到预定的容差限内。这需要通过模态分析对样品/夹具结构响应有一定的了解。在试验设置阶段进行在线模态分析非常重要,通过它可以对特定振动量级引发的非线性特性进行评估。只有这样才可能对样品/夹具结构的动态特性有准确的评估。

A.4 夹具的潜在问题

A.4.1 偏心问题

A.4.1.1 直接连接

有时将激振器直接连接到夹具或样品上,会对激振器的骨架和动圈组件施加弯曲运动和横向载荷,导致运动发生偏心,动圈会与励磁线圈发生刚蹭。如果没有意识到这一点可能会对激振器的励磁线圈造成很大损坏最终造成激振器故障。为降低这种风险,应在激振器和试验机构之间使用柔性关节。建议事先对所使用的振动系统进行检查,查找类似缺陷。

A.4.1.2 软绳悬挂

另一个造成偏心的原因是用软绳悬挂样品并将其连接到激振器上。软绳会被拉伸,如果环境温度升高这种情况会加剧。例如悬挂样品的吊绳即使在室温条件下短时间内就会伸长几毫米。

A.4.2 松动

样品、夹具或支撑悬挂都会出现松动,所以在试验前对所有固定装置进行全面检查确保它们紧固是非常重要的。固定装置包括所有的连接:螺栓、垫片、螺母、折页、电连接器等。激振器与夹具或样品的连接处常出现松动,导致试验数据变坏。有些情况下激振器与夹具之间的松动会使得有效推力下降,使样品产生虚假频率分量的振动。如果在试验中发现控制品质下降,就应该去检查激振器、夹具和样品之间的连接是否松动。

A.4.3 预应力

如果激振器与样品之间出现倾斜或不正常的连接,就会对样品施加预期之外的预应力(垂直或横向)。液压作动筒也会由于移动而产生预载荷。应记住预载荷会显著影响样品的动态特性,也可对设备造成损坏。电缆、管路和接头不正常的连接也会产生预载荷。

A.4.4 电缆摆动

当使用压电传感器时应特别注意。如果测试电缆固定方法不当就会产生摆动,特别是那些电缆离开样品或夹具的地方。这种情况会由于电缆在样品上的机械拍击造成误差、电干扰或电缆上的摩擦生电效应。

A.4.5 过载

过载通常表现为测量系统的输入输出时域信号的削波、饱和或谐波失真。检查过载最好的办法是用示波器观察测量系统所有输出,或观察过载指示器,通常动态试验设备都会有。激振器的过运动也会造成相应运动的削波和谐波失真。一般激振器的功率放大器上会有过载指示,发生过载时将给出相应的报警信息。

A.4.6 温度效应

温度的变化所引发的次生效应有偏心或预载荷。如果预计会出现温度变化,最好要确认试验设备能适应试验温度,并对温度进行监测,必要时进行补偿或修正。温度效应还会影响样品、夹具和悬挂支撑结构的动态特性,如刚度或阻尼。例如如果用金属夹具来模拟实际使用情况,而实际使用时样品是用复合材料固定的,此时就要确保常温、高温和低温下都适用。

A.4.7 阻抗失配

通常是功率放大器和振动激振器之间的电气失配。如果监测信号如动圈电流表明出现谐波失真,就应当检查是否出现阻抗失配的情况。

A.4.8 传感器安装不当

传感器安装得不好会导致出现松动、削波、噪声信号高和横向信号大等现象,在监测信号上出现谐波失真。位置和朝向是否正确非常重要,一般应遵照生产商的指导方法进行安装以减小传感器安装带来的问题。

A.5 安装简单样品

本章给出简单样品如“黑箱”及动力学特性近似于惯性的样件。这种情况下夹具通常很小,产品安装在一个板型夹具上与激振器相连,或安装在立方形夹具上以便进行不同轴向的振动。在进行振动试验前安装简单样品时应考虑以下问题:

- a) 应在“环境试验规范”中规定安装方式,或尽管没有规定但恰当安装方式非常明显。当然,如果没有明显恰当的安装方式,在安装方法应符合本节和前面所说的原则。一般应按照实际使用的方式对样品进行固定。如果一个样品有多种安装方式,则所有的方式都应当加以考虑。如可行,可使用实际安装结构的一部分作为夹具,因为这种方法能够很好地代表实际情况。“环境试验规范”应说明是否使用实际安装结构,哪些位置上的安装点作为试验的控制点。
- b) “环境试验规范”应说明重力影响是否重要。如果重要,样品应按照重力方向与实际使用时的方向相同的方式安装。如果重力影响相对不重要,样品可以按照任意姿态安装。典型的对重力敏感的产品包括惯性导航单元,重力是所施加载荷的重要组成部分(一般重力为峰值载荷的10%),还有重力会影响不对称的结构。
- c) 应避免使用多余的绑带。样品上所有连接件如电缆、管路等的固定都应产生与样品实际安装时的固定和质量效应。要想达到这一目的,可能需要将电缆和管路等固定在夹具上,如果没有想到这点可能会使得连接器如插头、插座和焊点出现不真实的失效。
- d) 所有情况下,样品安装到夹具的方式应能够代表其在实际使用时的情况。多数情况下样品应当通过刚性连接器固定在激振器上。当然,如果振动载荷不是通过连接器传递的,或者找不到明显的固定点,例如包装箱,这时就需要考虑其他的固定方式(例如捆绑)。
- e) “环境试验规范”应规定试验所使用的夹具以及安装夹具、激振器和样品的步骤。
- f) 使用中带有减震装置的设备在试验时应与减震器一起试验。这是因为很难精确地模拟和再现减震器动态特性,其动态响应明显受到温度影响。如果没有办法带着减震器一起试验,进行试验时应对严酷度进行修改,修改应依据对减震器动态响应特性的测试,并在“环境试验规范”中进行明确。如果已知试验严酷度在不同的轴向有差异,修改时要考虑这一点。
- g) 如果连续的振动会导致样品和减震器出现不真实的加热效应,在“环境试验规范”中应规定持续振动和间隔时间,并在试验过程中测量样品和减震器的温度。间歇时间的长短应与实际使用的剖面相一致。

A.6 振动试验夹具

A.6.1 概述

对外挂进行飞机外部挂飞或自由飞状态的多激励振动环境试验时,需要特别考虑如何通过试验装置来施加动态激励和支撑样品。本章给出了针对不同机型的不同动态激励施加方法以及模拟使用期激励机理的不同方法。

A.6.2 固定翼飞机

A.6.2.1 振动来源

对于在固定翼飞机上挂飞的外挂,产生振动的主要来源是作用于外挂表面的气动效应。对于螺旋桨飞机,还包括从载机传递过来的机械振动。

A.6.2.2 试验方法

想要通过机械激励来模拟此环境,最好通过从外挂表面或外挂的正常支撑点来施加振动。主要有四种试验方法可以采纳,如下:

- a) 在低自然频率的支撑上,将外挂安装在其正常使用时的挂架上。通过安装在外挂表面的柔性耦合器(驱动杆)施加振动。
- b) 在外挂的正常连接位置上通过联接器(俗称“牛头”)进行安装。
- c) 在外挂的正常连接位置上通过刚性很大的夹具进行安装并通过夹具进行激励。这种方法主要适用于小到中型的外挂,通常需要刚性的“窝”型夹具。
- d) 一种方法是用两个振动激励器支撑外挂,另一种方法是用架子来支撑外挂。这两种方法都需要采用多点激励,通常是把两个振动激励器布置在同一平面内。

A.6.3 旋翼飞机

对于使用旋翼飞机挂飞的外挂,振动是通过直升机机构传递的,但也包含向前飞行和旋翼向下产生的气流引起的振动。机械振动试验可以采用通过常规安装点施加激励的方式来进行。根据试验目的,安装配置应尽可能与实际一致。这是因为使用期间在旋翼飞机上安装的外挂的振动频率一般与主旋翼通过频率更接近。因此这两个频率之间的关系对外挂振动影响很大。可以通过将外挂安装在实际的连接点,有时通过使用期的安装设备来进行一个好的动力学试验。大多数情况下,为了试验的方便,把安装设备连接到一个相对“窝”型的刚性夹具上。

A.6.4 试验配置的选择

大多数动力学试验配置的选择是基于外挂结构、可用的试验装置和期望的真实程度。使用低频支撑配置,可以通过激励点的选择,使得振动响应分布近似于使用期内经历的情况。刚性支撑机构的配置利用已有的外挂连接点或联接器(俗称“牛头”),使得对振动的分布进行剪裁不易实施。最具代表性的支撑和激励方法是使用多个激励器。

A.6.5 柔性配置

样品及其正常使用的挂飞装置通过结构架悬挂在低频支撑上。通过杆或其他适当的装置把振动源的振动施加到样品上相对坚硬的、结构支撑点上,或通过把联接器(俗称“牛头”)或卡箍布置在外挂合适的点进行激励。试验设置应使得系统(样品/支撑/激励器)的振动刚体模态(平动或旋转)低于 10 Hz。

A.6.6 刚性配置

样品通过正常使用的挂飞设备或类似设备连接到振动源。通过安装夹具(“窝”型)对样品进行激励,其刚度应使得其固有共振频率尽可能高,并与任何桨叶通过频率及其相应谐波不重叠。夹具的共振频率如果处在试验范围内,应提高阻尼以降低共振幅值。

A.6.7 多点激励

A.6.7.1 适用对象

多激励器系统主要针对动力学复杂的、长径比大的细长装备。如果在结构上能量的平衡是重要考虑因素或需要很大的推力时,也会使用多激励器系统。多激励器系统主要用于多台单轴模式的振动试验以及多台多轴模式。

A.6.7.2 范围

使用多激振器系统可以对一定范围的产品进行振动试验,方法如下:

- a) 多个独立的激振器在一个控制器的控制下在同一平面内运动。
- b) 多个激振器以单激振器模式运行(即对所有激振器使用单一的振动谱)。
- c) 多个激振器按多轴配置运行。

A.6.7.3 最初需求确定

在考虑夹具设计时,关键是要在最初阶段确定多台试验的需求。夹具应尽可能与使用期的结构支撑匹配,以再现产品使用时的动态载荷和结构动态响应特性。

A.6.7.4 连接装置

一般来说,根据产品和准备进行的试验的不同,夹具的形状和尺寸会有很大不同。可以考虑采用固定的和柔软的连接装置,如下:

- a) 用联接器(俗称“牛头”)直接连接或与结构直接连接。
- b) 用柔性驱动杆和折页/刃型支撑直接连接。
- c) 根据需要限定的运动自由度,使用转轴、球形节等。
- d) 在水平滑台上配置上述装置。

A.6.7.5 动态响应特性

考虑下列装备不同的动态响应特性,一般有助于夹具和控制策略的选择与评估。合理的振动试验夹具取决于要进行试验的装备的动力学复杂性和尺寸:

- a) 不同长径比的柔性对称动力学结构;
- b) 带有柔性末端的刚性动力结构;
- c) 动力学和几何形状上非对称结构;
- d) 大型刚性结构,此时推力是主要问题;
- e) 上述分类的装备在运输和贮存的容器内。

A.6.7.6 支撑布局

对于被试装备的主支撑的布局需进行考虑。原则上,夹具的设计应为装备提供足够的支撑,同时尽可能减少正交轴的耦合影响和激励器的轴外影响。非预期的正交轴运动应尽可能小,这点非常重要。在进行夹具设计时要特别关注刚体模态,不过随着控制算法的改进,这个问题有可能可以解决。同时也需考虑在装备内部存在位移的差异,并且这种差异会怎样影响激励器。控制系统并不能在所用情况下都可以适应糟糕的夹具设计。

A.6.7.7 常规产品安装

除非另有规定,应让样品按正常使用的朝向安装,依次在三个相互正交的轴向上进行试验。如有可能应使用试验件的正常安装方法通过合适的夹具将试验件与激振器连接。安装夹具的刚度应使得其固有频率尽可能高并且不影响样品的响应。

A.6.7.8 复杂产品安装

另一种方法(例如对于大型复杂产品)是把样品悬挂在支撑结构上。这时,试验的设置应使得刚体模态(平动和转动)的频率低于试验的最低频率。通过杆或其他适当的装置把振动源的振动施加到样品

上相对坚硬的、结构支撑点上,可以通过预试验确定这些点。夹具应能够使得施加到样品上的激励能够尽可能真实地模拟使用期间传递过来的振动。

A.6.8 通用夹具的考虑

A.6.8.1 挂飞设备的连接

外挂应通过能复现使用期间的挂飞设备的连接方式进行悬挂。应避免使用附加的箍带或支撑,除非它们本身就是使用期挂飞装置的组成部分。连接到样品上的电缆、管路等的布置应使其对样品的动态约束、质量与外挂在正常使用条件下安装的情况相似。

A.6.8.2 设计时间要求

对夹具设计的考虑应在试验方案的初期进行,并且是产品鉴定试验规范的一部分。

A.6.8.3 与作动器连接

在 6.6 中提出的与作动器连接有关的问题同样适应于普通夹具的设计要求。

A.6.9 外挂部件的试验

A.6.9.1 部件单独外挂

如果要对外挂部件单独进行试验,应以具有代表性的方法模拟实际使用期内全状态的安装约束/输入。进行部件的试验应考虑:

- a) 如果减震器是样品的一部分,样品应带减震器进行试验。
- b) 考虑局部支撑结构的动态效应,应对试验规范的输入进行剪裁,该支撑结构包括限制动态特性的典型夹具。
- c) 全状态配置的动态响应对被样品动态行为的影响,以便在试验中部件的失效模式能被考核到。
- d) 采用全状态试验,可以为部件提供最真实的试验方法。

A.6.9.2 部件在结构内部

如果部件埋在结构的内部,则夹具的问题会减轻。因为此时仅需要复现局部的结构动态响应特性。可在试验夹具中使用局部的结构,典型的安装点,并了解所有安装点的振动试验谱(可以是使用期的,也可由实验室生成)。

A.6.9.3 部件构成了结构

如果部件构成了结构的内在组成,就需考虑全状态试验或采用附加的连接部件以模拟外挂的整体结构响应。

附录 B
(资料性附录)
刚体空间运动测量原理

B.1 多激励试验基本理论

多激励试验基本理论本质上与单激励的理论相同,但是在进行多激励试验时需要考虑到一些额外因素。这些因素与多激励单轴和多激励多轴、多激励试验的适用性相关。例如,将参考时程或频谱内容与试验的结果进行比较,以上这些都是本附录需要要考虑的。由于这种新试验方法的引进,主要的振动控制系统供应商可提供时域波形复现(TWR),正弦,冲击、随机试验和窄带随机+随机等多种多点激励试验。

最简单的多激励单轴(MESA)和多激励多轴(MEMA)试验就是由多个激振器激励产生一个或者多个自由度。传统的单激励单轴(SESAs)试验,参考信号有两种:一种是时域信号,另一种是幅频曲线如自功率谱密度。多激励试验(MET)的控制过程需要多个通道。对于时域控制中的MET,需要多个时间历程作为参考信号,而对于频域控制中的多激励试验,不仅需要定义自功率谱密度,也需要定义互功率谱密度。不管是时域控制还是频域控制,MET的系统辨识(传递函数)是一个矩阵运算,而SESAs的传递函数只是简单的除法运算。

多激励单轴(MESA)和多激励多轴(MEMA)试验的复杂性要求参与计划实验和操作实验的试验工程师有相应的技术水平。深刻理解被测对象,确保在多自由度实验中当遇到一些不可避免的困难时,也能够正确处理被测对象。

B.2 多自由度试验参考点注意事项

B.2.1 参考数据注意事项

进行多激励试验的第一步是要获取足够的参考数据。此外还要考虑一些关键测试参数,如动态范围,传感器的频率响应特性、数量和空间位置,数采设备等。为了实现多自由度试验运动的复现,而去理解多自由度系统的动态特性以及传感器空间位置对于系统空间的约束是不重要的。

B.2.2 参考点运动学

关于运动重建过程中线性加速度计使用的讨论在参考文献[6]中有说明。参考文献[6]专门研究了所需的单轴传感器的数目,以及6自由度运动重建数据采集阶段这些传感器在现场的位置。时域分析应用了经典力学中的动力学。

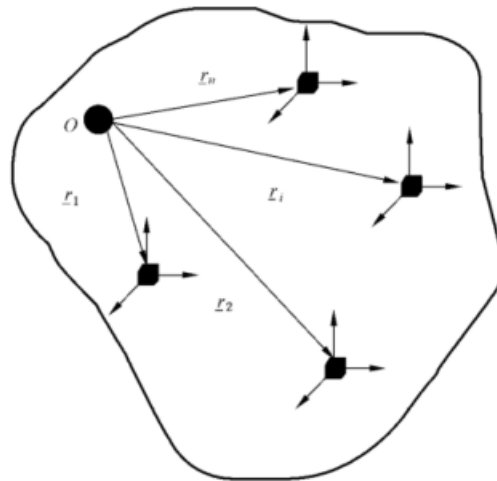


图 B.1 具有 n 个加速度传感器布置

在处理 6 自由度复现所需的输入时,参考文献[6],构造了一个如图 B.1 中 n 个 3 轴线性加速度计的物体,加速度计布置如图 B.1 所示。由经典力学可知,第 i 个传感器测量的加速度由式(B.1)给出。

$$\underline{a}_i = \underline{a}_o + \underline{\alpha} \times \underline{r}_i + \underline{\omega} \times (\underline{\omega} \times \underline{r}_i) + \underline{\varepsilon}_i, i = 1, 2, \dots, n \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

其中, \underline{a}_o 表示被测物体一个参考点的加速度, $\underline{\alpha}$ 和 $\underline{\omega}$ 分别代表刚体角加速度和角速度, \underline{r}_i 表示第 i 个传感器相对于参考点的位置, $\underline{\varepsilon}_i = \underline{\ddot{r}}_i + 2 \underline{\omega} \times \underline{\dot{r}}_i$ 代表非刚体效应的影响(如弹性)。忽略弹性效应(即 $\underline{\varepsilon}_i = 0$), 式(B.1)代表 n 个向量公式, 公式中有 3 个未知向量($\underline{a}_o, \underline{\omega}$ 和 $\underline{\alpha}$)。通常, \underline{a}_o 是未知的, 只有在那个位置事先设置一个传感器才知道。为标识方便, 使用等价矩阵操作重写式(B.1)为式(B.2), 式(B.2)中忽略弹性效应。

$$\underline{a}_i = \underline{a}_o + \underline{\alpha}^\times \underline{r}_i + \underline{\omega}^\times \underline{\omega}^\times \underline{r}_i = \underline{a}_o + \underline{\Omega} \underline{r}_i, i = 1, 2, \dots, n \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式(B.2)中, $\underline{\alpha}^\times$ 和 $\underline{\omega}^\times$ 为对称矩阵, 表示向量叉积, $\underline{\Omega} = \underline{\alpha}^\times + \underline{\omega}^\times \underline{\omega}^\times$ 表示角运动对测量的线加速度的影响(比如, 切向及向心加速度的贡献)。假设 $\underline{\alpha} = \alpha_x \underline{i} + \alpha_y \underline{j} + \alpha_z \underline{k}$ 以及 $\underline{\omega} = \omega_x \underline{i} + \omega_y \underline{j} + \omega_z \underline{k}$ 为物体固定参考系中角加速度和角速度, 那么:

$$\underline{\alpha}^\times = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha_z & \alpha_y \\ \alpha_z & 0 & -\alpha_x \\ -\alpha_y & \alpha_x & 0 \end{bmatrix}, \underline{\omega}^\times = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

$$\underline{\Omega} = \begin{bmatrix} -(\omega_y^2 + \omega_z^2) & \omega_x \omega_y - \alpha_z & \omega_x \omega_z + \alpha_y \\ \omega_x \omega_y + \alpha_z & -(\omega_x^2 + \omega_z^2) & \omega_y \omega_z - \alpha_x \\ \omega_x \omega_z - \alpha_y & \omega_y \omega_z + \alpha_x & -(\omega_x^2 + \omega_y^2) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

实验室中真实的运动复现需要使用测量的加速度(现场数据)来构造驱动点加速度, 需要知道 \underline{a}_o (3 个未知量) 和 $\underline{\Omega}$ (9 个未知量), 总共 12 个未知量。由于矩阵只是由 6 个独立变量组成(即 $\underline{\alpha}$ 和 $\underline{\omega}$ 等的分量组成)。因此, 如果 $\underline{a}_o, \underline{\alpha}$ 和 $\underline{\omega}$ 能够由测量的现场数据确定, 理论上, 现场的运动就能够在实验室中精确(测量仪器误差范围内)复现。

参考文献[6]显示在最通常情况下, 需要 9 个变量($\underline{a}_o, \underline{\alpha}$ 和 $\underline{\omega}$) 对运动进行重建, 因此, 需要的传感器通道数至少是 9 个。分析显示如果特定约束施加到运动上(如 $\alpha_o = 33$), 适当安装 6 个传感器。另外, 如果考虑刚体的角速度 $\underline{\omega}$ 与角加速度 $\underline{\alpha}$ 的动力学关系(即 $\underline{\alpha} = \frac{d\underline{\omega}}{dt}$), 那么频域上的实现同样将所需变量个数从 9 个变为 6 个。

两种所述的限制(即 $\underline{\alpha}_0 = 33$ 或频域实现)使用 6 个传感器已经足够,与振动试验环境中的条件是一致的。 $\underline{\alpha}_0 = 0$ 的假设并不能提供用于精确运动重建的足够信息。实际上,在大多数情况下,只有 $\underline{\alpha}_0 \alpha$ 是需要唯一确定的,另外需要充分应用 $\underline{\alpha}$ 和 $\underline{\omega}$ 的动力学关系。因此,两个影响最大的约束在频域上被简化为角速度和角加速度的关系[即 $\underline{\alpha}(s) = s \underline{\omega}(s)$]。需要注意的是,这种条件只适用于刚体。考虑弹性时,不宜使用 6 个传感器。

实际上在理想条件下,6 个准确安装的线性加速度传感器对于 6 自由度的运动复现是足够的。特别地,与实验室振动试验情况类似,式(B.1)中的 $\underline{\alpha}_0 = 0$ 或 $\underline{\alpha}_0 \cong 0$ 是保证样品非监测点上加速度和速度精确复现的必要条件。实际上试验对象并不一定是刚体,此时就会不可避免地出现现场和实验室环境条件不同而导致的机械阻抗不匹配。在这些条件下,将导致系统传递函数矩阵 H_{xy} 的条件个数出现问题。

为了处理这类问题,推荐采用一种由适当的线性加速度传感器组成的超定反馈方案(控制通道数量 $>$ 机械自由度)。一种被证明可行的方法是选择 3 个不共线的三轴向线性加速度传感器组。这种方法可以用于很多场景,比如任何一架飞机都可以使用,唯一的关键因素是传感器的相对位置保持非共线。

附录 C

(资料性附录)

时不变线性多自由度系统辨识

C.1 传递函数估计

利用超定反馈技术(具体讨论参见附录 B)与传统单自由度试验中使用多通道进行平均以解决动力加载的常规做法相类似,该技术在加权控制方面非常有优势。在进行多自由度振动试验中,如果采用超定反馈方案且线加速度传感器合理布局,则可以用最小二乘的方法对 H_{xy} 进行估计,可为多通道方案提供一种合理的控制方法。当然,任何控制方案都不能让结构产生不符合自然规律的运动,因此经常需要对夹具进行优化设计,这与常规的单自由度案例相类似。 H_{xy} 最小二乘估计的精度直接决定了实际使用平台与实验室试验平台之间模态的相似程度。

基于之前有关传感器布局方面的动力学考虑和讨论,很显然需要为所有的测量点位置提供一个中心点以作参考。认真测量并记录每一个传感器的具体位置和极性。另外,应对在实验室中安装样品的方案进行事先策划,确保可以在准确的位置上安装测量传感器。

C.2 信号变换

对于用传统的平移(X, Y, Z)和转动(滚动绕 X , 俯仰绕 Y , 摇摆绕 Z)等工程物理量定义 6 自由度试验参考信号的情况,需要在线传感器测量量与传统 6 自由度工程单位之间进行转换。由于对于多个自由度试验可以有多种激振器的组合方案,因而线性传感器测量物理量与传统 6 自由度工程单位之间的转换矩阵是针对具体试验而异的。另外,进行多自由度系统试验时可能考虑给某个自由度上的激振器分配不同的权重或者引入非旋转、非平动自由度(如弯曲自由度)的控制方法。基于输出信号转换的动力学在处理过激振器试验系统时非常有用,可以确保为具有常规机械自由度的激振器分配合理的补偿信号。对信号变换的详细讨论见参考文献[7]和参考文献[14]。

C.3 控制实现

C.3.1 概述

本附录不提供处理多点单轴和多点多轴振动试验具体的控制算法。实际上,不同的多点激励试验控制系统供应商采用不同的控制策略。然而,有一些基本概念对解决多点单轴和多点多轴控制问题非常关键,下面将详细介绍。

附录 B 关于线加速度计布局的理论是从时域的角度发展而来。尽管时域方法对于理解刚体动力学方面非常有用,可用来制定不同点加速度分布的需求,但把它作为一个实时的控制方案并不实际。事实上,驱动信号是基于频域传递函数估计而生成的。

控制系统供应商开发了多种不同的控制算法用于多自由度多点激励试验的实施。尽管供应商将控制技术中的许多细节当做秘密,本附录就多自由度试验对 H_1 型传递函数估计作为基本的概念加以介绍和讨论。对基本定义的回顾表明了互谱分量在多自由度多点激励试验过程中的重要作用。这部分内容在本附录中进行了总结,并在参考文献[4]中由 Bendat 和 Piersol 进行了详细讨论。

C.3.2 单输入单输出(SISO)自功率和互功率谱密度

在讨论多点激励试验中传递函数矩阵估计之前,先考虑下面一些基本的标量定义(Bendat 和 Piersol 在参考文献[4]中提出)。讨论中假设 2 个平稳的(各态历经的)高斯随机过程 $x(t)$ 和 $y(t)$ 。 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的有限傅里叶变换定义为:

$$X(f) = X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

$$Y(f) = Y(f, T) = \int_0^T y(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

无限时间长度 T 的 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的自功率谱和互功率谱密度分别定义为:

$$G_{xx}(f) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E[|X(f, T)|^2]$$

$$G_{yy}(f) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E[|Y(f, T)|^2]$$

$$G_{xy}(f) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E[X^*(f)Y(f)]$$

在有限时间长度内对 $\tilde{G}_{xx}(f)$, $\tilde{G}_{yy}(f)$, $\tilde{G}_{xy}(f)$ 的估计定义为:

$$\tilde{G}_{xx}(f) = S_{xx}(f) = \frac{2}{T} [|X(f, T)|^2]$$

$$\tilde{G}_{yy}(f) = S_{yy}(f) = \frac{2}{T} [|Y(f, T)|^2]$$

$$\tilde{G}_{xy}(f) = S_{xy}(f) = \frac{2}{T} [X^*(f)Y(f)]$$

具有离散的频谱分辨率为 $\text{Be} \approx \Delta f \approx \frac{1}{T}$ 。由于原始估计有较大的随机误差,使用 $S_{xx}(f)$, $S_{yy}(f)$ 和 $S_{xy}(f)$ 计算谱密度通常难以接受。实际上为了减小随机误差(参考文献[4]),对 n_d 个时间长度为 T 的时间段的信号分别计算然后进行平均,从而获得平滑估计:

$$\tilde{G}_{xx}(f) = \frac{2}{n_d T} \sum_{i=1}^{n_d} [|X(f, T)|^2]$$

$$\tilde{G}_{yy}(f) = \frac{2}{n_d T} \sum_{i=1}^{n_d} [|Y(f, T)|^2]$$

$$\tilde{G}_{xy}(f) = \frac{2}{n_d T} \sum_{i=1}^{n_d} [X^*(f)Y(f)]$$

C.3.3 单输入单输出传递函数和相关函数定义

另一个在单输入单输出系统分析方面非常有用的工具是传递函数和相关性估计。两个概念在参考文献[4]中有详细解释。利用之前自功率谱和互功率谱定义,频响函数(传递函数)的最优估计定义为:

$$\hat{H}_{xy}(f) = \frac{\hat{G}_{xy}(f)}{\hat{G}_{xx}(f)}$$

对应的相干函数定义为

$$\hat{\gamma}_{xy}^2(f) = \frac{|\hat{G}_{xy}(f)|^2}{\hat{G}_{xx}(f) \hat{G}_{yy}(f)}$$

传递函数描述了频域内输入和输出信号之间的增益和相位关系,而相干函数表明传递函数中相干

的大小。相干函数取值范围是 $0 \leq \hat{\gamma}_{xy}^2(f) \leq 1$, 0 表示不相关, 1 表示完全相关。注意对于单输入单输出情况, $\hat{H}(f)$ 和 $\hat{\gamma}_{xy}^2(f)$ 计算是在每一根离散谱线处简单的除法运算。下面的章节从讨论的单输入单输出观点中提出多输入多输出的观点。在下面的讨论中, 认为的估计都是用合适数量的多组测量值进行的平滑后得到, 不再使用“标志”。

C.3.4 多输入多输出(MIMO)自谱、互谱, 以及初始传递函数估计

C.3.4.1 概述

考虑下面 m 输入 n 输出的 MIMO 系统, 不失一般性, $m \neq n$ 。见图 C.1 [假设线性时不变系统(LTI)]。



图 C.1 m 输入 n 输出的 MIMO 系统

C.3.4.2 频域传递函数关系

定义输入跟输出之间的频域传递函数关系有多种方法。下面采用 Welch 方法进行各谱的平滑估计:

- a) 定义 $X(f)$ 为 m 个输入的列向量, $Y(f)$ 为 n 输出的列向量。

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}$$

- b) 定义 $X(f)$ 和 $Y(f)$ 之间的传递函数矩阵 $H_{xy}(f)$ 。

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{m1} & H_{m2} & \cdots & H_{mn} \end{bmatrix}$$

- c) 定义瞬时功率谱

$$S_{xx} = X^* X', \text{ 瞬时输入自功率谱 } (m \times m)$$

$$S_{yy} = Y^* Y', \text{ 瞬时输出自功率谱 } (n \times n)$$

$$S_{xy} = X^* Y', \text{ 瞬时互功率谱 } (m \times n)$$

- d) 定义 k 次平均的累积功率谱:

$$G_{xx} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_{xx_i}, \text{ 累积输入自功率谱 } (m \times m)$$

$$G_{yy} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_{yy_i}, \text{ 累积输出自功率谱 } (n \times n)$$

$$G_{xy} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_{xy_i}, \text{ 累积互功率谱 } (m \times n)$$

C.3.4.3 关键传递函数推导

考虑到 C.3.4.2a) 和 b) 的定义, 可以得出

$$Y = H'_{XY} X$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{m1} & H_{m2} & \cdots & H_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix}$$

依据 C.3.4.2d) 中累积自功率和互功率谱的定义, 重写输入/输出关系:

$$Y' = (H'_{xy} X)' = X' H_{xy}$$

$$X^* Y' = X^* X' H_{xy}$$

$$G_{xy} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_i^* Y'_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_i^* X'_i H_{xy} = \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_i^* X'_i \right] H_{xy} = G_{xx} H_{xy}$$

$$G_{xy} = G_{xx} H_{xy}$$

$$G_{xx}^{-1} G_{xy} = G_{xx}^{-1} G_{xx} H_{xy}$$

$$G_{xx}^{-1} G_{xy} = H_{xy}$$

在实验室进行多点激励试验时, H_{xy} 的初步估计是基于一组不相关的随机输入信号得到的。期望信号 Y 可以直接测量或者由 6 自由度模型进行预测计算, 而输入信号 X (激振器的输入信号) 未知。

由于 $Y = H' X$, 因而 $(H')^{-1} Y = (H')^{-1} H' X$, 得 $(H')^{-1} Y = X$ 。

通常情况下 $m \neq n$, $(H')^{-1}$ 需要采用伪逆 (Moore-Penrose) 进行计算。这种计算涉及 H_{xy} 的奇异值分解 (SVD)。奇异值分解提供如下两组有用的信息: 第一, 提供谱线基础上的矩阵 H_{xy} 的阶数; 第二, 提供矩阵 H_{xy} 动态范围。两组信息有利于在计算驱动信号时判断潜在噪声的影响。采用奇异值分解方法对 H_{xy} 进行估计比传统方法 (如 Cholesky 分解) 计算量大; 但奇异值分解方法鲁棒性更强, 能处理一些特殊矩阵, 如长方矩阵和奇异矩阵。奇异值分解法可以通过奇异最大值与最小值的比率来直接处理和解决系统动态范围和噪声方面的问题。

从程序 2 控制算法的角度, 人们可以直接通过 H_{xy} 来计算 G_{xx} 。

由 $Y = H' X$, 可以得到

$$Y = H'_{xy} X$$

$$Y' = (H'_{xy} X)' = X' H_{xy}$$

$$Y^* = (H'_{xy} X)^* = H'^*_{xy} X^*$$

$$Y^* Y' = (H'^*_{xy} X^*) (X' H_{xy})$$

因此

$$G_{yy} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Y_i^* Y'_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k H'^*_{xy} X^* [X'_i H_{xy}] = H'^*_{xy} \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_i^* X'_i \right] H_{xy} = H'^*_{xy} G_{xx} H_{xy}$$

$$G_{yy} = H'^*_{xy} G_{xx} H_{xy}$$

得到

$$G_{xx} = (H'^*_{xy})^{-1} G_{yy} (H_{xy})^{-1}$$

参考文献 [4] 中进行了更加详细的讨论, 其中包括误差分析。另外, 不同的控制系统供应商通常采用专利技术, 根据时域和频域的误差, 提高响应向量和参考向量之间的收敛程度。利用既定的分析结果, 上述讨论只是针对复杂 6 自由度振动试验系统中作出的阐述和说明。特别注意的是基本原理是基于线性时不变系统, 而且参考测量值是从刚体获得的。很明显两个假设均不适用于实验室的振动试验, 即使是单点单轴情况也不适用。当前问题是如何确立多点激励试验可接受的一个度量标准。

C.3.4.4 关键传递函数另一种推导方法

另一种常用的传递函数推导方法只是在 C.3.4.2 和 C.3.4.3 推导的基础上做如下一些小的变化。

a) 定义 $X(f)$ 为 m 个输入信号的列向量, $Y(f)$ 为 n 个输出信号的列向量(与 C.3.4.2 一致)。

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}$$

b) 定义 $X(f)$ 和 $Y(f)$ 之间的传递函数矩阵为 $H_{xy}(f)$

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{m1} & H_{m2} & \cdots & H_{mn} \end{bmatrix}$$

c) 定义瞬时功率谱为:

$$S_{xx} = XX^*, \text{瞬时输入自功率谱}(m \times m)$$

$$S_{yy} = YY^*, \text{瞬时输出自功率谱}(n \times n)$$

$$S_{xy} = YX^*, \text{瞬时互功率谱}(n \times m)$$

d) 定义 k 次平均后的累计功率谱

$$G_{xx} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_{xx_i}, \text{累积输入自功率谱}(m \times m)$$

$$G_{yy} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_{yy_i}, \text{累积输出自功率谱}(n \times n)$$

$$G_{yx} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_{yx_i}, \text{累积互功率谱}(n \times m)$$

应用线性时不变系统的输入、输出关系并且基于 C.3.4.4c) 和 C.3.4.4d) 中累积自功率和互功率谱定义做如下替换, 可得:

$$G_{yy} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Y_i Y_i^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k H_{xy} X_i [H_{xy} X_i]^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k H_{xy} X_i X_i^* H_{xy}^* = H_{xy} G_{xx} H_{xy}^*$$

$$G_{yx} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Y_i X_i^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k H_{xy} X_i X_i^* = H_{xy} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_i X_i^* = H_{xy} G_{xx}$$

从而得到:

$$G_{xx}^{-1} G_{yx} = H_{xy}$$

注意 C.3.4 中讨论的两种方法形式上非常相似。人们通常可以根据喜好或计算优势来进行选择。

C.3.5 多输入多输出(MIMO)相干函数

C.3.5.1 概述

在多输入多输出(MIMO)情形中需要进一步拓展相干函数的概念。参考文献[1]中和[4]中对这个问题进行了详细讨论。下面是 3 个应用于 MIMO 线性系统情况下基本的相干定义。

C.3.5.2 常相干

常相干函数定义为两个单独频谱之间描述线性关系的相关系数。在多输入情况下, 解释常相干系数方面需小心谨慎。输出与给定输入间由于其他输入信号的影响, 即使两者保持严格的线性关系, 其相干系数可能远远小于 1。对于一个线性 MIMO 系统, 常相干定义为:

$$\gamma_{mn}^2(f) = \frac{|G_{xy_{mn}}|^2}{G_{xx_{mn}} G_{yy_{mn}}}$$

其中

$$\begin{aligned} G_{xx_{mn}}(f), & \text{输入自功率谱}(m \times m) \\ G_{yy_{mn}}(f), & \text{输出自功率谱}(n \times n) \\ G_{xy_{mn}}(f), & \text{输入输出的互功率谱}(m \times n) \end{aligned}$$

C.3.5.3 偏相干

偏相干函数定义为一个条件输出与另一个条件输出,一个条件输入与另一个条件输入,或者一个条件输入与一个条件输出之间的常相干。单个输入与输出信号通过消除其他输入信号的贡献量来进行条件处理。对于条件排列的每一个输入-输入、输出-输出和输入-输出组合都存在偏相干函数。

C.3.5.4 重相干

重相干函数定义为描述一个给定输出与所有已知输入线性关系的相关系数。每一个输出信号都有多个重相干函数。重相干函数为评估噪声、非线性对每一个输出信号的未知贡献量的程度和相对重要性提供一个很好的方法。

同常相干情形一样,重相干值小表示感兴趣的输出信号与输入信号之间相干性不大。这个信息在闭环控制过程中是非常关键的,因为会影响到传递函数的估计。实际上,多自由度控制系统使用重相干函数作为一个重要的试验参数。控制算法将计算每一个输出通道在每一条谱线处的重相干值。试验中在更新传递函数之前,都会评估重相干函数确保达到一个特定的门槛值(即 $\gamma_{mn}^2 \geq 0.7$)。如果用户定义的门槛值没有达到,则对应谱线处的传递函数将不做更新。偏相干和重相干在参考文献[4]中进行了详细讨论。同时在参考文献[1]中针对偏相干函数和重相干函数提出有趣的见解。

C.3.6 驱动信号补偿

之前对自功率谱密度和互功率谱密度进行了讨论,随后利用它们对如何进行系统传递函数和相关相干函数计算也进行了介绍。上述这些知识都可以应用在多点激励试验初始系统辨识阶段。初始传递函数辨识之后,类似传统单点单轴情况对输出驱动信号进行更新。尽管每个控制系统供应商算法细节不尽相同,但主要有如下两种基本的驱动信号更新算法。

第一种驱动信号更新技术是简单地基于系统传递函数的连续更新,并贯穿整个试验过程用于处理和解决系统出现的一些微小变化(参考文献[13])。但是,需要注意的是对于任何频率驱动信号并不是部分不相关的,因此在这些频率处传递函数的修正将不可实现。

[1] NATO STANAG 4370, Environmental Testing, Allied Environmental Conditions and Test Procedure AECTP 200, Mechanical Environmental Testing, Category 240.

[2] International Test Operations Procedure (ITOP) 1-1-050, "Development of Laboratory Vibration Test Schedules," 6 June 1997, DTIC AD No. B227368.

[3] International Test Operations Procedure (ITOP) 1-2-601, "Laboratory Vibration Schedules," 19 October 1992, DTIC AD No. B1695661.

[4] Bendat, Julius S. and Allan G. Piersol, Random Data Analysis and Measurement Procedures, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.

[5] IEST Recommended Practice Handbook for Dynamic Data Acquisition and Analysis, Institute of Environmental Sciences and Technology, Arlington Place One, 2340 S. Arlington Heights Road, Suite 100, Arlington Heights, IL 60005-4516.

[6] Fitz-Coy, Norman and Hale, Michael T., "On the Use of Linear Accelerometers in Six-DOF Laboratory Motion Replication: A Unified Time-Domain Analysis," Proceedings of the 76th Shock and Vibration Symposium, Nov. 2005, Shock & Vibration Information Analysis Center (SAVIAC), Three Chopt Rd. (Suite 110), Richmond, VA 23229.

[7] Underwood, Marcos A. and Keller, Tony, "Applying Coordinate Transformations to Multi-DOF Shaker Control," Sound and Vibration, January 2006, Sound and Vibration Website.

[8] Shock and Vibration Handbook, 5th Edition, Edited by Cyril M. Harris and Allan G. Pier-sol, McGraw-Hill, New York NY, 2002.

[9] Smallwood, David O., "Multiple Shaker Random Vibration Control—An Update," SAND 98-2044C.

[10] Smallwood, David, Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Linear Systems Extreme In-puts/Outputs, Shock and Vibration 13 (2006) 1-25; Manuscript number SAV-05-058; IOS Press, Inc., 4502 Rachel Manor Drive, Fairfax, VA 22032.

[11] Hale, Michael T., "Consideration of Global Error Metrics in the Conduct of MDOF Motion Replication," Proceedings of the 77th Shock and Vibration Symposium, Nov. 2006; Shock & Vibration Information Analysis Center (SAVIAC), Three Chopt Rd. (Suite 110), Richmond, VA 23229.

[12] Underwood, Marcos A. and Keller, Tony, "Using the Spectral Density Matrix to Determine Ordinary, Partial, and Multiple Coherence", Proceedings of the 77th Shock & Vibration Symposium, October, 2006; Monterey, California.

[13] Underwood, Marcos A., "Multi-Exciter Testing Applications: Theory and Practice," Proceedings—Institute of Environmental Sciences and Technology, April 2002.

[14] Plummer, A.R., "Control Techniques for Structural Testing: A Review", Proc. IMechE Vol. 221 Part 1: J. Systems and Control Engineering, 2007.

[15] (Copies of Department of Defense Specifications, Standards, and Handbooks, and International Standardization Agreements are available online at <http://assist.daps.dla.mil/quicksearch/> or from the Standardization Document Order Desk, 700 Robbins Avenue, Building 4D, Philadelphia, PA 19111-5094.)

参 考 文 献

[16] Requests for other defense-related technical publications may be directed to the Defense Technical Information Center (DTIC), ATTN: DTIC-BR, Suite 0944, 8725 John J. Kingman Road, Fort Belvoir VA 22060-6218, 1-800-225-3842 (Assistance-selection 3, option 2), <http://stinet.dtic.mil/info/s-stinet.html>; and the National Technical Information Service (NTIS), Springfield VA 22161, 1-800-553-NTIS (6847), <http://www.ntis.gov/>.

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
环境试验 第2部分:试验方法
试验 Fx 和导则:多输入多输出振动
GB/T 2423.62—2018

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址:www.spc.org.cn

服务热线:400-168-0010

2019年1月第一版

*

书号:155066·1-61615

版权专有 侵权必究



GB/T 2423.62-2018