

QJ

中华人民共和国航天行业标准

FL 1680

QJ 1579A—2005

代替 QJ 1579—1988

航天器系统级振动试验方法

Vibration test method for spacecraft

2005—12—12 发布

2006—05—01 实施

国防科学技术工业委员会 发布

前 言

本标准代替QJ 1579—1988《卫星整星振动试验方法》。

本标准与QJ 1579—1988相比，有下列主要变化：

- 试验对象从卫星扩大到航天器；
- 增加了第4章“试验条件及允许偏差”中试验允许偏差；
- 增加或修改了第5章“试验仪器、设备”中测量系统，包括传感器的选择、安装以及信号调节器、数据采集处理系统等要求；
- 删除了QJ 1579—1988中5.3“振动控制方式”中的单点控制和开环控制；
- 修改了第6章“试验件及试验夹具”中试验件安装要求；
- 增加了第7章“试验”中试验文件和振动试验流程图。

本标准由中国航天科技集团公司提出。

本标准由中国航天标准化研究所归口。

本标准起草单位：航天科技集团公司第五研究院总装与环境工程部、第五研究院总体部。

本标准主要起草人：徐兰菊、高非、韩晓健、白松波、朱凤梧。

本标准于1988年12月首次发布，2005年12月第一次修订。

航天器系统级振动试验方法

1 范围

本标准规定了航天器系统级产品的正弦和随机振动试验的目的、技术要求、方法和程序等。
本标准适用于各类航天器系统级产品（以下简称试验件）的振动试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包含勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GJB 1027A—2005 运载器、上面级和航天器试验要求

3 试验目的

3.1 航天器鉴定级或准鉴定级振动试验

航天器鉴定级或准鉴定级振动试验的目的为：

- a) 检验航天器经受鉴定级或准鉴定级振动环境的能力；
- b) 获取航天器有关部位振动响应数据；
- c) 对在组件级振动试验时无法合理考核的组件在系统级振动试验中进行考核。

3.2 航天器验收级振动试验

航天器验收级振动试验的目的为：

- a) 检验航天器经受验收级振动环境的能力；
- b) 暴露航天器材料和工艺缺陷，提高航天器的飞行可靠性。

3.3 航天器结构模型振动试验

航天器结构模型振动试验的目的为：

- a) 验证结构设计和制造工艺；
- b) 测量航天器有关部位的振动响应数据，为制订或修改组件振动试验条件提供依据；
- c) 试验大纲中规定的其它目的。

4 试验条件及允许偏差

4.1 试验条件

试验条件按GJB 1027A—2005和有关试验技术文件规定。

4.2 试验允许偏差

一般应采取以下试验允许偏差：

- a) 正弦振动：
频率：±2%；
加速度幅值：±10%。

b) 随机振动:

加速度功率谱密度:

10Hz~100Hz (分析带宽10Hz或更窄): $\pm 1.5\text{dB}$;

100Hz~1000Hz (分析带宽为中心频率的10%或更窄): $\pm 1.5\text{dB}$;

1000Hz~2000Hz (分析带宽100Hz或更窄): $\pm 3\text{dB}$;

统计自由度: 不小于100;

总均方根加速度值: $\pm 1\text{dB}$;

试验持续时间: 0~10%。

当不采用上述试验允许偏差时, 在试验前, 试验方与送试方应协商给出试验允许偏差并经送试方认可。

5 试验仪器、设备

5.1 概述

振动试验仪器、设备包括: 振动台系统、振动控制系统、测量系统及辅助设备。所有仪器、设备应经二级以上(含二级)计量部门检定合格, 并在检定有效期内使用。

5.2 振动台系统

5.2.1 振动台

振动台的要求如下:

- a) 额定推力应大于根据运动部分总质量及试验加速度过载要求所估算的需用推力;
- b) 额定静载能力应大于试验件及夹具的质量之和, 如不能满足此要求则需采用弹性支撑, 其支撑系统的固有频率应低于 1.5Hz, 且位移变化量应大于振动台的最大位移;
- c) 最大位移应大于试验条件所规定的位移要求;
- d) 使用频率范围应能满足试验条件所规定的频率上、下限要求;
- e) 电动振动台台面的漏磁量应小于有关试验技术文件规定的允许值。

5.2.2 振动台辅助设备

水平滑台作为振动台的辅助设备, 主要要求如下:

- a) 抗倾覆力矩应大于试验件横向振动产生的倾覆力矩;
- b) 台面应具有平直的频响特性;
- c) 台面应具有较大的抗弯刚度, 如果不满足使用要求, 应采用加强台面, 加强台面与滑台台面的接合面应满足滑台台面平面度要求, 连接后滑台活动正常;
- d) 额定静承载能力应大于试验件、夹具及加强台面的质量之和;
- e) 滑台台面各点的响应应均匀。

5.3 振动控制系统

振动控制系统一般包括: 加速度传感器、信号调节系统、振动控制仪, 对于特殊系统还有其它仪器。振动控制系统应满足如下要求:

- a) 振动控制仪应具有多点平均、多点响应限值控制及滤波处理等功能;
- b) 控制用传感器一般采用压电式加速度计, 其灵敏度应根据试验量级的大小来选择, 使信号调节器在最佳的信噪比下工作, 原则上控制用加速度计的灵敏度应比较高;
- c) 加速度计的频响范围应满足使用要求, 其固有频率应至少为试验频率上限的 5 倍;

- d) 加速度计的横向灵敏度不大于主轴方向灵敏度的 3%;
- e) 加速度计一般采用螺纹连接或胶接, 应浮地;
- f) 所有测试电缆应为低噪声电缆, 其电缆走向应使电磁干扰减至最小, 加速度计与电缆接头应拧紧, 电缆应固定, 防止因抖动而产生的摩擦电噪声。

5.4 测量系统

5.4.1 概述

测量系统包括: 传感器(加速度计、位移计、应变)、信号调节器、应变放大系统、数据采集处理系统等。

5.4.2 传感器

5.4.2.1 传感器的选择

传感器的选择应遵循以下原则:

- a) 根据被测量部位的局部刚度和重量, 选择不同重量的加速度计, 从而减少附加质量的影响;
- b) 加速度计灵敏度和量程范围的选择应考虑被测件的响应大小和背景噪声;
- c) 加速度计的频响范围应满足使用要求, 其固有频率应至少是试验频率上限的 5 倍;
- d) 加速度计的横向灵敏度不大于主轴方向灵敏度的 5%;
- e) 加速度计的幅值线性度在试验范围内不大于 1%;
- f) 对应变测量, 应根据需要选择应变片的形式(单向或应变花)、尺寸、量程和精度等级, 所用电缆应为低噪声电缆。

5.4.2.2 传感器的安装

传感器的安装要求如下:

- a) 加速度计一般采用胶接, 特殊情况下可采用螺接, 应浮地;
- b) 一般情况应对试验件测点部位进行打磨, 然后用丙酮或乙醇清洗; 打磨时注意尽量不破坏结构表面, 对不允许有破坏的情况下, 不打磨只清洗, 然后在测点位置上粘贴不干胶铝基并打磨铝基;
- c) 加速度计安装完毕应用胶带固定传感器, 以避免试验中传感器脱落砸坏被测试验件;
- d) 连接电缆用胶带固定或线绳绑好, 其电缆走向应使电磁干扰减至最小; 加速度计与电缆接头应拧紧, 防止因抖动而产生的摩擦电噪声;
- e) 应恰当处理粘贴应变计位置的结构表面, 严格按使用说明书安装应变计; 应注意的是, 粘贴应变计是应变测量过程中最关键的步骤, 不正确的粘贴工艺将严重降低应变测量的有效性。

5.4.2.3 传感器的拆卸

传感器的拆卸要求如下:

- a) 拆卸传感器时应先确认传感器无松动, 如有松动应记下其测点号和通道数, 在试验报告中进行分析;
- b) 拆卸时应注意不能破坏试验件的结构表面, 拆卸后应对表面的残余物进行清理;
- c) 拆卸时不能造成传感器和电缆的损坏。

5.4.3 信号调节器及动态应变放大系统

信号调节器的主要性能指标要求如下:

- a) 信号调节器的滤波器应具有线性相移特性, 试验频率范围内的误差在 ± 1 dB 范围内;

- b) 具有可调节放大功能,最好可归一化输出;
- c) 幅值线性度不大于 1%。

动态应变放大系统的技术指标应满足有关试验技术文件提出的对应变测量的要求。

5.4.4 数据采集处理系统

用于航天器系统级振动试验的数据采集处理系统在硬件和软件指标方面应满足系统级试验要求。

5.5 接地

振动台系统、振动控制系统、测量系统及辅助设备应分别接地,接地电阻应不大于 $1\ \Omega$ 。

6 试验件及试验夹具

6.1 试验件状态要求

试验件应符合有关技术试验文件规定的产品技术状态。

6.2 试验夹具要求

试验夹具的要求如下:

- a) 夹具刚度质量比应尽可能大,优先采用铝镁合金材料整体铸造或焊接成型;
- b) 夹具与试验件的对接面应尽量模拟试验件与运载火箭的对接面,夹具的形状与几何尺寸应满足试验件及振动台接口要求;
- c) 在整个试验频率范围内,夹具与试验件连接面上的各点响应应均匀;
- d) 夹具的一阶固有频率应高于试验件振动试验最高频率,当无法满足时,夹具的一阶固有频率应至少高于试验件一阶固有频率的 3 倍;
- e) 夹具应经验收合格。

6.3 试验件安装要求

6.3.1 安装悬吊保护带的要求

悬吊保护带的安装要求如下:

- a) 保护带总的许用拉力至少应大于试验件起吊时的起吊载荷,并应有一定的安全裕度;
- b) 保护带固定点应高于试验件 1m 以上;
- c) 安装完成后,保护带保持松弛,在正常的试验过程中应保证不对试验件产生附加力。

6.3.2 试验件安装要求

试验件安装要求如下:

- a) 振动台或水平滑台应保证正常工作;
- b) 水平方向试验时,如有需要,安装加强台面;
- c) 夹具与台面之间的接合面应保证均匀接触;
- d) 夹具与台面的连接螺栓刚度应保证在试验频率范围内均匀地传递推力,使用标准的力矩扳手施加预紧力;
- e) 试验件与夹具对接过程中,应防止试验件突出部分与夹具相撞;
- f) 试验件与夹具的连接应尽可能模拟试验件实际边界条件;
- g) 如果需要安装悬吊保护带,则按 6.3.1 的要求完成。

7 试验

7.1 试验文件

试验文件包括试验前文件和试验后文件，试验前文件包括试验实施方案、技术流程等，试验后文件为试验报告。

试验文件应经过试验评审小组的评审，并在修改、审批后归档保存。

7.2 试验加载控制方法

7.2.1 加速度输入多点控制方法

航天器系统级振动试验应优先选用多点平均控制方法，也可采用极值控制。对于正弦振动试验，每个控制通道的数据处理方式有绝对值峰值法、跟踪滤波峰值法和有效值峰值法等，具体方式由相关试验技术文件确定。

7.2.2 响应限值控制或条件下凹控制

全量级试验中，如有需要，可以采取响应限值控制的方式，或采取试验条件主动下凹控制的方式，响应限值控制条件或下凹控制条件由送试方根据有关试验技术文件中规定的下凹准则确定。

7.3 试验程序和方法

7.3.1 试验流程

系统级振动试验的全过程分为试验前准备、试验实施和试验后处理三部分，振动试验流程图如图1所示。

7.3.2 试验前准备

7.3.2.1 夹具准备

按6.2的要求，进行夹具的设计、加工与验收。如果使用已有的夹具，则需对试验夹具的状态进行确认。

7.3.2.2 试验文件准备

根据试验任务书和试验大纲的要求编写试验所必需的试验文件，如试验实施方案、技术流程等，试验文件应经过试验评审小组的评审，并经过修改、审批，试验后归档保存。

7.3.2.3 安全检查

按下述要求对试验室及试验件进行技术安全检查：

- a) 起重设备应检定合格，并在有效期内使用，必要时应用配重试吊；
- b) 试验件进场前应对试验室供、配电系统进行安全检查；
- c) 试验件上有火工品或其它易燃、易爆、有毒、有害物品时，应按有关文件进行管理；
- d) 应按有关规定管理试验件上高压容器。

7.3.2.4 仪器、设备检查

对振动台系统、控制系统和测量系统的全部参试系统进行检查，使其处于正常工作状态。

7.3.2.5 振动台调试

振动台的调试分别按垂直与水平两个方向进行。

调试步骤如下：

- a) 振动台处于试验状态（垂直或水平方向），系统正常工作；
- b) 将振动试验夹具安装在振动台上；
- c) 如果需要，安装结构件进行调试，如果没有结构件，可以用配重代替；
- d) 按试验技术文件规定的控制点的位置安装所有的控制传感器；
- e) 按试验技术文件规定的正式试验时的最高量级对振动台进行调试，同时监视各系统的工作情况。

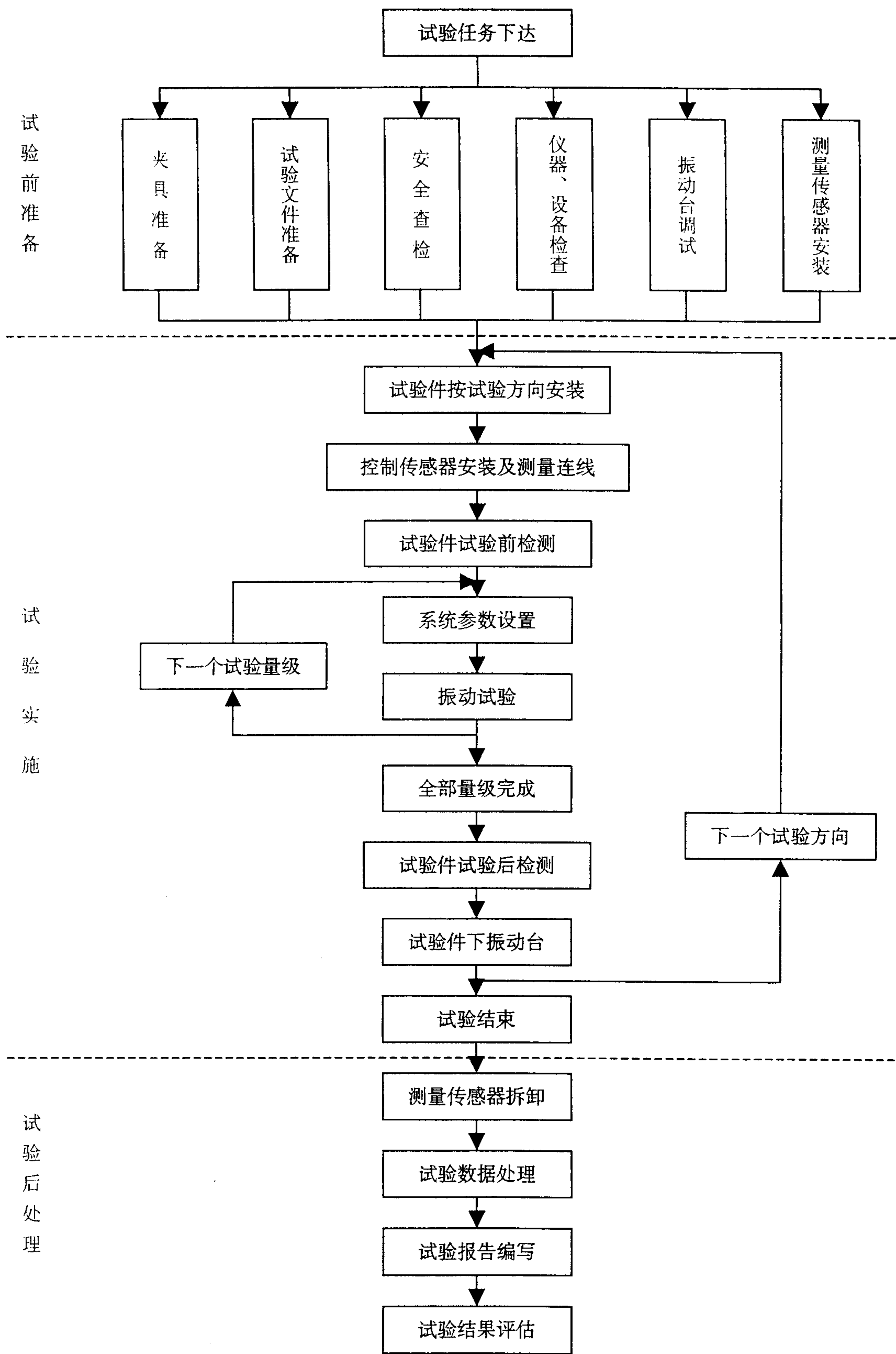


图 1 振动试验流程图

7.3.2.6 测量传感器安装

按5.4.2.1～5.4.2.2的要求进行测量传感器的选择及安装，安装程序如下：

- a) 在试验件总装阶段安装试验件内的测量传感器及电缆，并完成测量回路的检查；
- b) 试验件进入试验现场后，安装其余测量传感器。

7.3.3 试验实施

7.3.3.1 试验加载顺序说明

7.3.3.1.1 概述

系统级振动试验一般在三个相互正交的方向上分别进行试验，具体的加载方向顺序应按有关试验技术文件的规定进行。

系统级振动试验的加载量级分为：

- a) 预振级试验；
- b) 定频试验；
- c) 特征级试验；
- d) 全量级试验。

其中，全量级试验包括：

- 正弦验收级试验；
- 正弦准鉴定级试验；
- 正弦鉴定级试验；
- 随机验收级试验；
- 随机准鉴定级试验；
- 随机鉴定级试验。

全量级试验的加载量级顺序一般从低到高。试验的顺序一般是先正弦振动试验后随机振动试验。在每个全量级试验前后，均应进行特征级试验检验。两个相邻的全量级试验之间可以只进行一次特征级试验。

一般情况下，一个加载方向上的试验顺序如下。

7.3.3.1.2 预振级试验

用于检查控制、测量及激励系统工作是否正常，同时进行控制系统参数的选择以达到最佳控制精度，试验的量级应小于特征级试验的量级。在征得送试方的同意后，可以进行多次的预振级调试。

一般情况下预振级试验是正弦振动试验，如有特殊要求，可以以随机振动的形式进行。

7.3.3.1.3 定频试验

如果需要，在单一的频率下对试验件进行激励，同时测量系统记录结构测点响应的时域信号。

7.3.3.1.4 全量级振动前特征级试验

特征级试验用于检验试验件在经历全量级试验后结构特性的变化情况。一般在全量级试验的前、后均需要进行特征级试验。

一般情况下特征级试验是正弦振动试验，如有特殊要求，可以以随机振动的形式进行。特征级试验的具体形式和量级大小应按有关试验文件规定进行，试验量级不宜超过验收级试验量级的1/3。

按试验文件规定的特征级试验条件对试验件激励，测量结构响应。如有要求，同时对试验件电性能进行检测。特征级试验后对关键测点响应进行分析，确定全量级振动试验的响应控制条件或下凹控制条件。

7.3.3.1.5 全量级振动

按试验技术文件规定的全量级试验条件完成振动试验，同时测量结构响应，并按有关文件进行电性能检测。

7.3.3.1.6 全量级振动后特征级试验

按7.3.3.1.4同样的量级对试验件激励，测量结构响应，进行特征检验，并判定固有频率及相应的共振峰值有无明显变化，如有变化应查明原因并采取相应措施。

此次特征级试验可作为下一个全量级振动试验前的特征级试验。

7.3.3.2 试验件安装

根据6.3的要求，按试验加载方向安装试验件。安装程序如下：

- a) 振动台处于垂直或水平试验状态；
- b) 在垂直试验时，如果有扩展台面，安装并进行系统调试；
- c) 在水平试验时，如果需要，安装加强台面并保证滑台工作正常；
- d) 将试验夹具按试验方向就位于台面上；
- e) 将产品就位于夹具上，并按要求进行与夹具的连接；
- f) 检查产品与夹具的连接状态。

7.3.3.3 控制传感器安装及测量连线

按5.4.2的要求进行控制传感器的选择和安装。程序如下：

- a) 确定控制点位置，安装控制用加速度计，控制点位置应选在试验件与夹具连接面上的连接螺钉附近，加速度计应与地绝缘；
- b) 如果需要，安装响应限值控制用传感器；
- c) 完成控制和测量系统的接线及回路的检查。

7.3.3.4 试验件试验前检测

按有关环境试验测试文件对试验件进行试验前检测。

7.3.3.5 系统参数设置

7.3.3.5.1 控制系统参数设置

控制系统参数设置如下：

- a) 设置信号调节器的传感器灵敏度、高低通滤波范围，并根据试验量级设置增益值。
- b) 设置控制仪的参数：
 - 在正弦扫频振动试验时，设置控制仪的参数，关键参数包括：试验频率范围、控制方式、灵敏度、试验量级、扫频方式、扫频方向、扫描速度、压缩速度和数据分析方式等；
 - 在随机振动试验时，设置控制仪的参数，关键参数包括：设置试验频率范围，试验量级、试验持续时间、分析统计自由度、频率分辨率、灵敏度、控制方式等；
 - 在定频振动时，按正弦扫频振动时的参数进行设置。

7.3.3.5.2 测量系统参数设置

测量系统参数设置如下：

- a) 设置信号调节器的传感器灵敏度，根据可能出现的响应量级设置增益值、高低通滤波范围，滤波范围应尽可能与控制系统协调一致。
- b) 设置采集系统的参数：

- 在正弦扫频振动试验时，设置数据采集处理系统的参数，关键参数包括：采样频率、试验频率范围、灵敏度及高低通滤波、频率分辨率、数据分析方式等，并尽可能与控制系统协调一致；
- 在随机振动试验时，设置数据采集处理系统的参数，关键参数包括：采样频率、频率分辨率、采集帧数、数据平均方式（线性平均、指数平均）、加窗方式、数据分析类型等；
- 在定频试验时，采样频率应能保证采集至少一个周期的时域信号，且不丢失波形信息。

7.3.3.6 振动试验

7.3.3.6.1 振动

根据试验文件的要求，按照控制系统、测量系统、振动台系统的操作规程，完成各个量级的试验。

7.3.3.6.2 试验记录

试验中应对试验过程和数据等进行记录。记录和存储的内容包括：

- a) 各种原始数据记录；
- b) 试验过程记录；
- c) 必要的照片及录象资料；
- d) 操作及检验结果记录；
- e) 试验故障及处理情况记录。

这些原始数据和资料经过整理后将用在有关的试验文件中。

7.3.3.6.3 异常情况处理

在试验过程中出现如试验中断、试验条件的更改、试验项目的增减、试验程序的更改等的异常情况时，试验中断的处理按7.4的规定进行，试验条件的更改、试验项目的增减、试验程序的更改等应经审批后方可实施。

7.3.3.7 该方向其它量级的试验

重复7.3.3.5~7.3.3.6，完成该方向其它量级的振动试验。

7.3.3.8 试验件试验后检测

在一个方向的所有量级的试验完成后，按下述要求对试验件进行试验后检测：

- a) 按有关环境试验测试文件对试验件进行试验后检测；
- b) 对试验件进行外观检查。

7.3.3.9 试验件下振动台

将试验件放于支架车上，以便对振动台及夹具进行操作。

7.3.3.10 其余方向的试验

重复7.3.3.2~7.3.3.9，完成其余方向的振动试验。

7.3.3.11 试验结束

满足下列要求，可结束试验：

- a) 完成试验技术文件所规定的所有试验项目，满足试验文件的试验要求；
- b) 试验控制满足试验文件中规定的试验条件及4.2中规定的试验允许偏差要求。

7.3.4 试验后处理

7.3.4.1 测量传感器拆卸

按5.4.2.3的要求进行全部测量传感器的拆卸。

7.3.4.2 试验数据处理

按下述规定处理振动试验响应数据，给出各方向试验响应结果：

- a) 正弦振动试验以幅值—频率曲线的形式给出控制和响应测量结果；
- b) 随机振动试验应给出数据的功率谱密度曲线、总均方根值；
- c) 提供试验大纲所要求的其它数据；
- d) 当控制及响应有明显的异常信号时，应对试验异常现象出现阶段的试验数据进行分析，判断异常现象产生的可能原因，为故障分析提供趋势或证据；
- e) 根据需要，将响应数据按标准格式进行数据传输或录入光盘（硬盘）。

7.3.4.3 试验报告编写

试验后应编写振动试验报告，并归档保存。

试验报告内容应包括：

- a) 任务来源；
- b) 试验目的；
- c) 产品技术状态；
- d) 试验要求；
- e) 试验室环境；
- f) 试验仪器、设备；
- g) 试验夹具；
- h) 试验实施过程；
- i) 试验数据；
- j) 试验异常及处理；
- k) 试验结果及分析；
- l) 试验结论；
- m) 必要时应附加图表、照片及声像记录。

7.4 试验中断及其处理

7.4.1 试验中断

出现下列情况之一时，应中断试验：

- a) 试验设备出现故障；
- b) 试验件及其地面测试设备出现故障；
- c) 试验中出现欠试验而不能达到预期试验目的；
- d) 试验中出现过试验而有可能造成试验件损坏或性能下降。

7.4.2 中断处理

试验中断的处理按下述原则进行：

- a) 试验设备引起的中断：在故障排除后继续试验之前，应判断中断对试验件有无影响，如果没有影响，则应确认试验件上的仪器、设备正常后，方可继续试验；如果有影响，则应在分析的基础上，做出是否继续试验的决定。继续试验原则上正弦振动试验应从中断频率开始，随机振动试验则应将剩余时间完成。
- b) 试验件上的仪器、设备故障造成的中断：在故障排除后，试验应重新开始。

- c) 欠试验引起的中断：在找出原因采取措施后重新试验，处理原则是正弦振动试验从欠试验时的频率开始，随机振动试验则应将出现欠试验时所剩余的时间完成。
- d) 过试验引起的中断：应在分析的基础上，做出是否继续试验的决定。

8 试验结果评估

按下述要求进行试验结果的评估：

- a) 试验控制满足试验文件中规定的试验条件及 4.2 中规定的试验允差要求；
 - b) 主要测量点的响应数据获取率应满足试验文件的规定；
 - c) 综合分析试验结果，确定试验是否达到预期试验目的。
-