

振动冲击试验方法与技术

(用电动振动台进行)

王树荣

前言

电动振动试验系统是环境试验的主要试验手段之一，用它可以完成环境试验标准中的振动试验和冲击试验。

当今国内外在环境试验上有许多标准和方法,但归纳起来为二大体系:

一类是以 IEC（国际电工委员会）为主体的国际通用的民用（商用）产品的环境试验体系,它是国际贸易中民用（商用）产品的环境适应性水平要求的共同语言、统一准则，它是以欧洲资本主义国家为主导制订的，可以说它是欧洲资本主义国家环境试验现状和水平的反映。我国自 80 年代开始采用等效或等同的方法先后将 TC50（环境试验）、TC75（环境条件）制订（转化）成环境试验国标（GB/T2423 系列标准）与环境条件国标（GB/T4798 系列标准）。IEC 标准的特点是模拟试验方法（程序）经典、试验再现性高。

另一类是军用产品的环境试验体系，最有代表性为美国的 MIL 标准和英国国防部 07-55 标准。我国自 80 年代开始采用等效或等同的方法先后将相同专业的美国 MIL 标准转换为我国军标，美国军标的特点是工程应用性好。在环境试验领域内最常用的美国军标和相应的我国军标示例见下表：

美国军标	相应的我国军标
MIL-STD-883E 微电子器件试验方法标准	GJB548A-96 微电子器件试验方法与程序
MIL-STD-202F 电子及电气元件试验方法	GJB360A-96 电子及电气元件试验方法
MIL-STD-810F 环境工程考虑与实验室试验	GJB150-86 军用设备环境试验方法 （等效 MIL-STD-810C/D）
MIL-STD-1504C 运载器、顶级飞行器、航天器试验要求	GJB1027 卫星环境试验要求

在此值得一提的是我国军标 GJB4-83 舰船电子设备环境试验是我国自行制订的国军标。

从上面的叙述可见，我国的环境试验标准有民（商）用和军用二大标准体系，民用是等效或等同采用的 IEC 标准体系，军用是等效或等同采用美国军标体系。

对上述等环境试验标准中的电动振动试验系统能完成的试验综合归纳一下，可以看出，电动振动试验系统的应用面是很广的，它既可进行振动试验又可进行冲击试验。

就振动类的试验而言，当今环境试验中的振动试验有：正弦振动方法、随机振动方法、拍频振动方法、时间历程方法、地震试验方法、声振试验方法等。其中随机振动方法又可分为宽带随机和窄带随机，在具体进行宽带随机振动试验时，还可将窄带随机或正弦振动叠加在在宽带随机振动上，对声振试验要在混响声场内进行，电动振动试验系统无法实现。

就冲击类的试验而言，当今环境试验中有：冲击试验、碰撞试验、颠簸试验、强碰撞冲击试验、倾跌与翻倒试验、自由跌落试验、随机跌落试验等。其中可以用电动振动台上完成的有冲击试验、碰撞试验、颠簸试验。在这里还要指出的是颠簸试验和碰撞试验其实是一回事，即在舰船电子设备环境试验中称颠簸试验，在其它专（行）业中称碰撞试验。

注：下面所介绍的可用电动振动试验系统进行的环境试验项目是从王树荣编著的环境试验一书中摘出来的。

第 12 章 正弦振动试验

12.1 试验目的、影响机理、失效模式

正弦振动试验的目的是在试验室内模拟产品在运输、储存、使用过程中所可能经受到的正弦振动及其影响。正弦振动主要是由于飞机、车辆、船舶、空中飞行器和地面机械的旋转、脉动、振荡等诸力所引起的。振动对产品的影响主要有：

(1) 对结构的影响

这种影响主要是指变形、弯曲、产生裂纹、断裂和造成部件之间的相互撞击等。这种破坏又可分为由于振动所引起的应力超过产品结构强度所能承受的极限而造成的破坏，以及长时间的振动（例如 10^7 次以上应力循环的振动）使产品发生疲劳而造成的破坏，这种破坏通常是不可逆的。

(2) 对工作性能的影响

这种影响主要是指振动使运动部件动作不正常、接触部件接触不良、继电器产生误动作，电子器件噪声增大、指示灯闪烁等，从而导致工作不正常、不稳定，甚至失灵、不能工作等。这种影响的严重程度，往往取决于振动量值的大小，而且这种破坏通常不属于永久性的破坏。因为在许多情况下，一旦振动停止，工作就能恢复正常，可见这种破坏往往是可逆的。

(3) 对工艺性能的影响

这种影响主要是指螺钉松动、连接件或焊点脱开等。这种破坏通常在一个不太长的振动时间内（例如半小时）就会出现。

上述的种种影响，特别是当产品的固有频率和激励频率相等引起共振而导致响应幅值急剧增大时，会更迅速和更严重地发生。1974 年日本对 121 艘船舶所作的调查中发现，在 4778 起设备事故中，由于振动引起的占 17%。在损坏的 656 件自动控制设备的元器件中，由于振动损坏的占 18.7%。我国的电子电工产品由于振动引起的结构破坏、性能下降、工作不良和失灵的事例也屡有发生，而且是比较严重的。所以，正弦振动试验是用来确定产品能否经受住预定的振动条件，能否在预定的振动条件下可靠地工作、不出故事和性能不发生下降的一种行之有效的方法。

实际上产品所遇到的振动在大多数情况下是随机性质的振动，对这些随机振动，本应随机振动试验方法进行试验更切合实际。但由于历史原因，即最先有的是简单的容易产生正弦振动，后随着科学技术的发展，复杂的技术含量高的随机振动才一步一步的发展起来。加上随机振动控制仪刚出来时设备价格昂贵，而且需要较高的技术操作水平，试验成本高，其次至今还有许多标准一直沿用正弦振动试验，所以当今还有相当一部分在使有中实际经受到的是随机振动，而在对产品的摸底、鉴定、例外和验收中用的仍是正弦振动试验来进行。另外，正弦振动还可用来研究产品的动态特性等。所以正弦振动试验在力学环境试验中还是一个最重要的振动试验项目，也是一个很经典的试验方法。。

12.2 正弦振动的描述

正弦振动试验是属于“规定一种机械运动”的力学环境试验方法，而这种机械运动就

是以正弦曲线为基本运动的轨迹。所以在正弦振动试验中，若知过去的运动状态就可以确定未来任何时刻运动的各要素。

当用位移来作为时变函数时，正弦振动的基本运动可用下式表示：

$$X = A_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (12-1)$$

式中：X - 某时刻的位移幅值

A_0 - 位移峰值

ω - 角频率

φ - 初相角

若初相角 $\varphi=0$ ，则：

$$X = A_0 \sin \omega t \quad (12-2)$$

对上式进行求导：便可得出速度和加速度的方程：

$$X' = \omega A_0 \cos \omega t = \omega A_0 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (12-3)$$

$$X'' = -\omega^2 A_0 \sin \omega t = \omega^2 A_0 \sin(\omega t + \pi) \quad (12-4)$$

从上述各式可以看出，速度和加速度与位移是具有同一频率的运动。但其相位而言，速度比位移超前 90° ，加速度又比速度超前 90° ，即比位移超前 180° ，说明加速度正比于位移而指向原点。

当加速度的单位用 g 表示时，正弦振动的基本运动有又可直接用下列方程表示：

$$a = a_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (12-5)$$

式中：a - 某时刻的加速度幅值

a_0 - 加速度峰值

ω - 角频率

φ - 初相角

当初相角为零时，则：

$$a = a_0 \sin \omega t \quad (12-6)$$

正弦振动试验的基本运动的时间历程如图 12-1 所示：

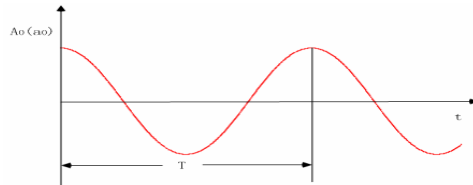


图 12-1 正弦振动试验的时间历程

就能量而言，正弦振动试验的能量存在于某一频率上，而不是幅值对频率的连续谱，如图 12-2 所示：

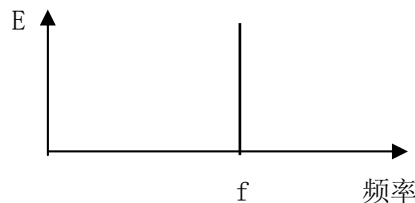


图 12-2 正弦振动能量谱图

从上述正弦振动试验的方程式和时间历程图可见，用频率、幅值两个参数就可以完整描述正弦振动试验的基本运动了。所以正弦振动试验的试验条件（严酷等级）由频率、振幅、试验持续时间三个参数共同确定。

12.3 试验条件及其选择

对正弦振动,目前国内外无论是军用标准还是民(商)用标准都被广泛采用着,不同的是采用的目的和施加的对象不一样。在微电子器件试验方法与程序的美军标和国军标中利用正弦振动对器件进行强度、疲劳和噪声考核,在电子及电气元件试验方法的美军标和国军标中除航天航空上的产品外,其它都用正弦振动进行环境适应性和结构完整性考核,在军用设备环境试验方法的美军标(810)和国军标(150)中用正弦振动进行振动响应检查和舰船设备环境适应性和结构完整性考核,在卫星环境试验要求美军标(1540)和国军标(1027)中也要用正弦振动进行响声检查与共振频率、模态、振型分析。在IEC和国标中正弦振动用得更为广泛。

前面已述,正弦振动试验的试验条件(严酷等级)有频率范围,振幅值,试验持续时间三个参数共同确定。

如果有产品安装平台环境条件数据就直接用产品安装平台的数据。如果没有,或是可用在多种场合使用、或是具有多种用途的货架产品、可以根据下面标准中给出的条件通过工程判断来确定时间历程振动试验的条件。

12.3.1 频率、频率范围及其选择

对频率、频率范围,首先要熟悉标准。有的标准(特别是军标)是直接给出,即按产品的使用环境直接给出了试验的频率或频率范围;民(商)用标准通常是用两种方式规定的。第一种方式是给出一组下限频率(通常为:0.1、1、2、5、10、55、100Hz)和一组上限频率(通常为:10、20、35、55、80、100、150、200、300、500、2000、5000Hz),由使用者根据需要进行选择试验频率和频率范围。另一种方式是直接给出一系列的频率范围(通常为:1-35、1-100、2-80、10-55、10-100、10-150、10-200、10-500、10-2000、10-5000、55-500、55-2000、55-5000Hz),使用者根据需要进行选择。

如何确定和选择和确定试验的频率范围?下面的叙述可供参考:

产品在运输、贮存和使用过程中,有时会遇到很低的振动频率,例如车辆上用的设备,其车辆主要基波频率可能低到在1.5~4Hz之间,而振动试验设备,要达到1.5Hz,其加速度波型失真就会超差很大,达不到试验的要求。因此在确定试验频率范围时就要权衡,如果一个产品试验频率范围不宽,低频端在1Hz或1Hz以下,高频端在100(或~500Hz),则可用液压振动台来实现;如果一个产品试验频率范围很宽,其高频段在500~2000Hz或以上,而低频端又要到1Hz或1Hz以下,则只能适当的提高低频段的起点频率,例如低频端从5~10Hz开始,因为要达到500~2000Hz的频率,必需用电动振动台来进行试验,而当今的电动振动台随着科学技术的发展,其低频端已达到5~10Hz(一些21世纪研制出的性能优良的电动振动台已达到2Hz,但加速度失真仍偏大)。

下面再以船用产品为例来说明这个问题。船舶的振动主要由船舶的动力机械产生的,因此下限频率应根据最低螺旋桨的轴速度来确定。目前国际和国内沿海和远洋船舶大部分都使用中、低速柴油机,它们的最低稳定转速在40~80转/分之间,因此下限频率应选择在5~10Hz。船舶的上限频率主要螺旋桨轴的转速 $\times$ 桨页数 $\times$ 60来确定。目前几个发达的资本主义国家的军用舰艇设备的振动标准中,其上限频率都是这样规定的。例如装有海神1250型柴油机的舰船,因其轴转速为11400转/分,经减速后为5150转/分,螺旋桨叶为三片,这样可取300Hz的频率为上限频率。对陆用和空用产品,也可视振源的特点,采用计算的

方法或现场实测的方法来确定其试验的频率及频率范围。

12.3.2 振幅及其选择

在正弦振动试验中，其振幅有位移幅值和加速度幅值二种，在实际试验时，有的试验仅给出位移幅值，有的试验同时给出位移幅值和加速度幅值。

仅给出一个位移幅值：对 IEC 标准和国标，其上限频率不超过 10Hz 的试验，只给出一个位移幅值；对美军标和国军标，例如电子及电气元件试验方法，在 10~55 Hz 的频率范围内也仅给出一个位移幅值，其值为 0.75mm(单振幅)。

同时给出位移幅值和加速度幅值：产品安装（放）平台实际振动的特点是频率愈高加速度愈大，频率愈低位移幅值愈大，而且是随着振动频率的变化而不断改变的。就对产品的影响而言，低频主要是位移破坏，高频主要是加速度破坏，而当今的正弦振动试验是建立在以往科学技术基础上的，当时（形成正弦振动试验时）的试验室模拟技术还不可能实现像现场振动一样随着振动频率的变化而其振幅有位移幅值不断改变，只能采用尽量逼近现场振动的方法，因此采用低频段位移幅值不变（称定位移），高频段加速度幅值不变（称定加速度），从定位移变到定加速度之间的频率称交越频率（振动特性一种关系变到另一种关系的频率）。在 IEC 标准和国标中有二种交越频率，即 8~9 Hz 的低交越频率和 57~62 Hz 高交越频率，前者主要用于舰船产品的试验，后者主要用于陆用和空用产品的试验。

就位移幅值和加速度幅值而言，对元器件类标准，由于其通用性，通常给出一系列可供不同用途整机进行选择的严酷等级，例如在微电子器件试验方法与程序的美军标和国军标中试验的频率范围为 20~2000 Hz，其振级有：0.75mm/20g、0.75mm/50g、0.75mm/70g 三个等级；在电子及电气元件试验方法中，高频振动的试验频率范围为 10~2000 Hz，其振级有：0.75mm/10g、0.75mm/15g、0.75mm/20g、0.75mm/30g、0.75mm/55g、0.75mm/80g 六个等级；

在 IEC 标准和国标中，对 8~9 Hz 的低交越频率，有 0.35mm/0.1g、0.75mm/0.2g、1.5mm/0.5g、3.5mm/1g、7.5mm/2g、10mm/3g、15 mm / 5g 七个等级，对 57~62 Hz 的高交越频率，有 0.35mm/5g，0.75mm/10g，1mm/15g，1.5mm/20g，2mm/30g，3.5 mm / 50g 六个等级，对上限频率只到 10Hz 的位移幅值，有 10 mm，35 mm，100 mm 三种位移幅值。在这里还需指出的是，对 IEC 标准和国标，它是不分元器件和整机的。对诸如美军标 810 和国军标 150 等军用装备（整机）标准，通常是按其安装平台的振动给出的。这种按其安装平台给出的振动是加严的，因为数据处理时它可能取的是实测振动的极值包络，有时还加上一定的安全系数。

12.3.3 试验的持续时间及其选择

试验的持续时间是描述产品的耐受振动能力的重要参数。对试验持续时间的选择相对于上述二个参数的选择要困难得多。因为目前一般很难给出多长的试验时间相当于实际使用的多少时间。对扫频试验，通常以扫频循环数给出试验时间。对定频试验，则直接以分钟和小时给出试验时间。IEC 和国标对扫频试验给出了 1，2，5，15，20，50，100 等七个扫频循环数等级，对定频试验给出了 10 分，30 分，1 小时，1.5 小时，2 小时，10 小时等六个试验时间等级；对微电子器件试验方法与程序和电子及电气元件试验方法的美军标和国军标，给出了 12 个（三方向）和 36 个（三方向）二种扫频循环数等级。在这里还需指出的是进行扫频试验时，其扫频速率通常为 1 倍频程/min。如何具体地选择试验的持续时间，通常是根据振动对产品的破坏机理来确定的。

振动对产品的破坏，一般可以分为三种，即对产品工作性能的破坏，对产品结构完好性的破坏，对产品寿命的破坏。如果主要考虑振动对产品工作性能的影响，如工作不正常、不稳定、失灵、甚至不能工作等，通常是振动一旦停止，工作性能就能恢复正常，所以其试验时间可按设备所需的最长连续工作时间结合实践经验来确定。结构破坏主要是指脱焊、

螺钉松动、连接件脱开、部件的相互撞击。对这种破坏一般在 30 分钟到一小时就能发现。对其中的螺钉松动和连接件脱开、部件的撞击也可按最长的连续工作时间来考虑。在某些情况下，也可按全部寿命时间来考虑。如果是为了确定产品承受累积应力的能力（疲劳），其时间应根据产品的使用要求，按使用时可能出现的应力循环数来确定，或按无限寿命，即 10^7 次应力循环来确定试验时间。

12.4 安装和控制

在正弦振动试验中，被试样品是否能真正受到所规定的试验条件（严酷等级）的考核，对于不同的人、不同的地点（设备）或不同的时间所做的试验，其结果是否都相一致，即试验是否具有高的再现性，在很大的程度上取决于试验时对样品的安装、固定以及试验中的控制和检测。

正弦振动试验标准中的试验条件，是以产品实际所遇到的环境振动为依据制定的，而且考虑的是振动输入点上的情况。所以对样品的安装固定以及试验中的控制与检测，必须根据这一原则来进行。然而，由于产品的品种繁多，大小形状不一，在具体处理时会碰到许多问题。如何解决？首先应选择好固定点。

所谓固定点就是固定样品的点。它是指样品与夹具、或样品与振动台台面点接触的部分。在实际使用时，此处通常是固定样品的地方。如果产品的实际安装结构的一部分作夹具使用，则应取安装结构和振动台台面点接触的部分作固定点，可见固定点一定要选取在产品在实际使用时振动输入的地方。有时振动试验的目的不是为了考核产品经受环境应力的能力，而是要考核产品的内部结构强度，例如晶体管、集成电路的内强度试验，此时固定点就要选择在样品的本体上，使激振力通过壳体传到内部结构上。

固定点确定以后，紧接着就是确定**检测点**。因为试验的要求需要通过检测点来保证，即检测点是用来保证样品在试验时，实际所受到的试验条件（严酷等级）能在所规定的容差范围内。检测点可位于夹具上、振动台或样品上，但要尽量接近固定点，并且在任何情况下，检测点上的传感器都要和固定点刚性连接。如果样品的固定点等于或少于 4 个，则每一个都作为**检测点**使用。如果超过 4 个，则规定 4 个具有代表性的固定点作检测点用。在特殊情况下，例如对大型和复杂的样品，检测点可以规定在其它地方（即不紧靠固定点）。当大量的小样品安装在一个夹具上时，或当一个小样品有许多固定的情况下，则选择一个检测点就可以了，但该点应选择在夹具上，其条件是夹具装上样品后的最低共振频率应超过试验的上限频率。

当固定点、检测点确定以后，就是确定**控制点**。因为检测点上的试验容差要求主要是通过控制点来保证的。**所谓控制点就是振动试验中用来取得控制所需反馈信号的点**，可见试验的准确性和再现性将取决于控制点控制试验的精度。**控制点是从检测点中选出来的**。而且为了使整个试验达到所规定的容差要求，控制点上的要求要高于检测点上的要求。控制点一般有二种：一种是单点控制的控制点；另一种是多点控制的控制点。

综上所述，为了使试验结果准确和达到高的再现性，在实际试验时，除要将控制点在规定的容差范围内，还应同时检查和监测各检测点上的试验量值是否在规定的容差范围内。

12.5 试验程序

正弦振动试验的程序通常有预处理，初始检测，初始振动响应检查，功能试验，强度（耐久）试验，最后振动响应检查，恢复，最后检测各步组成。下列各步是正弦振动试验的核心。

12.5.1 初始振动响应检查

初始振动响应检查的目的是寻找和确定样品的危险频率（指样品本身的共振频率，以及由于振动而使样品出现功能故障、性能指标超差等的频率），为如何做好功能试验，强度（耐久）试验提供资料。在早期的振动试验标准中，这一步称为共振检查。后来在实践中发现，产品在这方面的薄弱环节不仅仅是共振点，要提高产品的抗振性能，还必须知道影响产品结构强度和性能的所有频率点。

事实上，振动响应检查还可以用来研究产品的动态特性及评价结构强度和疲劳特性，因为共振频率或其它有关响应频率的变化往往标志着刚度的变化（例如连接松动），或疲劳的出现。特别是当有了样品使用环境条件方面的数据后，响应检查就更为有用，因为可以根据响应检查的结果来改进设计，使产品的主要危险频率尽量避开实际使用环境条件中出现的频率。或采取相应措施。

初始振动响应检查一般可按功能试验或耐久试验相同的条件进行，即用功能试验或耐久试验相同的振幅值，也可用低于功能试验或耐久试验相同的条件进行，主要看能否检查出危险频率，和用功能试验或耐久试验相同的条件进行是否会对功能试验或耐久试验的结果有影响。振动响应检查通常以 1 倍频程 / 分的速率在一个扫频循环上完成。但在具体进行响应检查时，应注意下列问题：

（1）注意扫频速率是否合理

振动台的激励频率通过产品的共振频率而造成的共振状态，除与该共振的动态放大因子(Q)和激励频率本身的幅值有关外，还与扫频的速率有关。若扫频的速率选择不合适，则被试系统的动态响应幅值可能会达不到稳定振动理论所预计的那样大。例如，如果扫频速率太快，则共振可能只能部分被激励，或在极端情况下甚至完全被漏掉。通常要保证达到静态谐振曲线（扫频速度为零）幅值的 95%，从 $f=0$ 扫到 $f=f_n$ (谐振频率) 的总振动次数，在衰减比值较小的情况下，应达到 N 大于或等于 300 个振动周期。此时的扫频速率可用 $V = f_n^2 / 300$ 来进行计算。图 13-3 表示出不同的振动周数对 $Q=20$ (图 13-3a)、 $Q=10$ (图 13-3b) 二个单自由度系统所激起的共振状态。

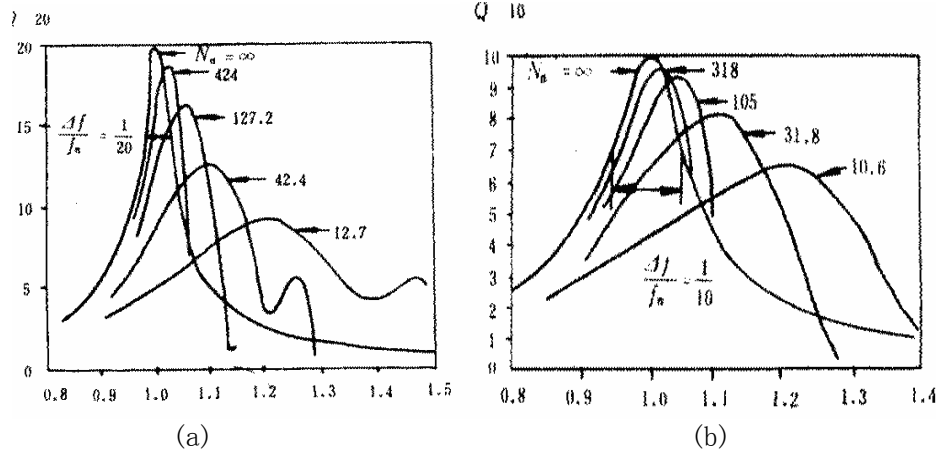


图 13-3 扫频速率对共振频率的影响

图中的横座标为理论共振频率与实际共振频率之比，由图中可见， N_n 值愈小（相当于高的扫频速率），不仅系统被激起的共振响应幅值愈小，而且显示出来的共振频率也愈高于系统的固有频率。可见当用 1 倍频程 / 分的扫频速率寻找共振频率时，若发现共振未被激起，则应检查扫频速率是否太快。但也应避免不适当的放慢，因为振动响应检查的时间通常是不从试验或耐久试验的时间中扣除的。

（2）注意响应的差异

响应的差异主要是指共振时幅值的大小不同和共振频率的不同，表现如下：

振动试验通常是在三条互相垂直的轴线上进行,而三条轴线上的共振频率和共振时的幅值大小往往是不相同的。

随着振动方向的不同,即从 f_1 扫到 f_2 和从 f_2 回扫到 f_1 ,两者所得出的共振频率也是有差异的,这点在比较耐久试验前后的共振频率是否发生变化时应充分注意到。

样品的局部共振频率及其幅值往往不同于样品整体的共振频率及其幅值。因此常需要探测样品内部的这种局部共振响应。在探测局部共振时,通常采用在被探测单元上安装传感器的方法来进行。例如将传感器安装在印刷电路板上、大型组件上、微型组件上,以测量局部共振的频率和放大因子。但这种安装不得改变被安装单元本身的动态特性,否则测出来的共振频率和响应幅值就不准确。

(3) 注意做好观测和记录

在进行初始振动响应检查时,应注意观测和记录各危险频率(特别是共振频率)上的响应幅值和激励幅值。如果响应幅值太大,可用降低激励幅值的方法进行。还应观测和记录在各危险频率上的样品的性能变化。以便与最后振动响应检查所得的结果相比较。

12.5.2 功能试验与强度(耐久)试验

功能试验的目的是考核产品在振动条件下的功能特性;强度(耐久)试验的目的是考核产品强度、疲劳和寿命。对于这两步,有些标准将其分开来进行,有些标准将其合在一起进行。分开进行时,其顺序是先进进行功能试验,后进行耐久试验,而且功能试验的幅值通常小于强度(耐久)试验的幅值(例如为强度(耐久)试验的一半)。合在一起进行时,先将功能试验的时间分成二个 $1/2$ 时间,其顺序是在强度(耐久)试验前完成 $1/2$ 时间功能试验,然后进行强度(耐久)试验,强度(耐久),强度(耐久)试验结束后再完成余下的 $1/2$ 时间功能试验。无论采用何种方法,在功能试验期间要进行功能检查和电性能检测。功能试验和强度(耐久)试验可用下列二种方法来完成:

(1) 定频试验

定频试验主要用在:

仅需进行预定频率试验的产品。因为某些在特定场合使用的产品(例如安装处受到某动力机械振动影响的产品),它所受到的主要振动频率是已知的,或可以测出来的。

为了研究产品在某些频率点上可能出现的疲劳影响,或研究样品经受振动的总能力,需要对产品进行长时间的(例如 10^7 次应力循环的)试验。

对危险频率点不超过 4 个样品,用定频试验方法进行试验较为合适。

(2) 扫频试验

扫频试验主要用在:

安装在各种运输工具上使用的产品。因为这类产品在实际使用中经受到的是一个很宽频率范围的振动。

危险频率点不十分明显,或危险频率点太多(多于 4 个)的样品。

装有减震器的样品。因为要防止在固定频率上试验时,由于动态放大系数过大而产生不符合实际的过度发热和损坏。

对上述(1)与(2)两种方式在实际运用时,通常只选用其中的一种(定频或扫频)就可以了,没有必要二者都选用(例如先用定频方式进行一段时间,然后再用扫频方式进行)。因为进行了危险频率点上的定频试验,就没有必要在整个试验频率范围内再进行扫频试验。其理由是危险频率的确定原则就是根据他们对产品的影响来决定的。同样用扫频方式进行试验后,也没有必要用定频方式再进行试验了。

定频方式与扫频方式相比,扫频方式的应用更广泛,它特别适用于那些结构复杂和封闭式的产品,而且对试验人员的技术水平的依赖性也低,所以通常都优先选用扫频方式进

行。

12.5.3 最后振动响应检查

最后振动响应检查的目的主要是为了进一步得到样品在试验前后的性能变化情况,它对确定样品试验后的疲劳特性和潜在损伤特别有用。

最后响应检查应该用与初始响应检查完全相同的方式、条件(如振动量值)和要求(如扫频速率)进行,例如扫频的方向不同,扫出的危险频率也有所不同,即向上得出的危险频率值与向下扫得出的危险频率值会有所不同,所以具体比较时只能将相同扫频方向上的危险频率值进行比较,看其是否发生了变化没有,否则就很难判断共振频率是否真的发生了变化。以及确定产品是否适用于预定的环境。

12.6 对试验设备的要求

任何一个试验室,要使正弦振动试验符合要求,首先应使振动试验系统符合要求,而且这种要求与下面介绍的振动试验一样,不是指振动试验系统技术条件中的技术指标,而是指试验台装上样品(包括夹具)后进行试验时,在固定点、检测点和控制点上的要求。这些要求有:

(1) 样品固定点应基本同相并沿平行直线运动

所谓同相是指各固定点所产生的正弦振动波形之间没有相位差。所谓平行直线运动是指各固定点的运动轨迹应为一直线,并且要相互平行。实际上往往振动台装上样品(包括夹具)后,由于样品(包括夹具)对台体的影响,会造成各固定点所产生的正弦振动波形之间不同相,同时也会造成各固定点的运动轨迹不是一条直线(例如椭圆)和不平行。这在某些情况下,就会直接影响到试验结果的精度和再现性。所以要求各固定点要基本同相并沿平行直线运动。

(2) 横向运动

横向运动是指与振动方向相垂直的方向上的最大振幅,而且具体是指垂直于振动方向的二相互垂直方向上最大振幅的矢量和与振动方向振幅之比。横向运动的测量通常在检测点上进行,而且仅需在所规定的试验频率上进行。对横向运动的要求,国标和 IEC 标准规定为:当频率低于或等于 500 Hz 时,应不大于 50%;当频率大于 500 Hz 时,应不大于 100%。对小样品可以规定为 25%。在特殊情况下,例如对大而复杂的样品,特别是重心不在振动台中心线上的样品以及要进行高频试验的样品,允许大于 100%。这些要求看起来似乎很低(因为振动台技术条件和检测方法标准中要求通常在 15%-25%之间),而实际上上述这些要求有时也不是很容易达到的。因为前面已说这些要求是指振动台装上样品(包括夹具)后,在检测点上的要求,而振动技术条件和检测方法标准中的要求是指空载或刚性负载下的要求。在实际试验中,若检测点上的横向运动达不到要求,可通过改用推力大的振动台,或通过改进夹具和安装等方法来达到。

(3) 波形失真

失真是振动台质量和性能好坏的一个重要指标。若失真大,则测量系统所测得的振幅就不准确,因为他既包括了一个所需的基本频率,又包含了许多高次谐波成分,这就会导致在所需的基本频率上产生低于规定的振幅值,从而造成欠试验等。在这种情况下,如果把基波幅值调到所规定的幅值上,则那些不需要的谐波频率成分的幅值也随之增加,并且会对试验样品产生一个与实际要求不相符的高应力,从而造成过试验。所以一定要重视正弦振动试验中的波形失真度要求。正弦振动试验中的波形失真度通常是指加速度波形失真度,而且是从控制点上检测。对加速度波形失真的要求,一般均规定为不超过 25%。在具

体测量时，对用电动振动台做试验时，其谐波成分应包含直到 5000 Hz，或试验台最高频率的 5 倍，而且在两者中取大者。对用机械台做试验时，其谐波成分可仅包含直到试验台最高频率的 5 倍。对 25% 的失真度要求无论是国产振动台还是进口振动台，一般均可达到。对特别大和特别复杂的样品，以及为了恢复基波幅值而使用跟踪过滤器时，通常也允许在试验频率范围内的某些频段上超过 25%。

对失真度还应注意它的定义和计算公式。国标和 IEC 标准中的规定为：

$$d = \sqrt{\frac{a_{tot}^2 - a_1^2}{a_1^2}} \times 100\% \quad (12-7)$$

式中： a_1 —激励频率（基频）的加速度有效值

a_{tot} —所施加的加速度总有效值（包括 a_1 ）

ISO3344（1980）中对电动振动台的规定为：

$$d = \frac{\sqrt{X_2^2 + X_3^2 + \cdots + X_n^2}}{\sqrt{X_1^2 + X_2^2 + \cdots + X_n^2}} \times 100\% \quad (12-8)$$

式中： X_1 —基波幅值

$X_2, X_3 \cdots$ —各次谐波幅值

显而易见，按上述两个公式计算所得的结果是不相同的。国产失真度仪是按 ISO 的规定设计的，所以用失真度仪测出的失真度偏小，希望使用者注意这点。

（4）幅值容差

正弦振动试验时的幅值容差是指检测点和控制点上的实际幅值与试验规定幅值之间的容差。对再现性要求比较高的试验，其幅值容差（包括仪器误差）为：

控制点：±15%（有些标准规定±10%）

检测点：当频率到 500Hz 时 ± 25%

当频率超过 500Hz 时 ± 50%

（5）频率容差

在正弦振动试验中，振动台、夹具、样品各点上的振动频率是相同的，所以对频率的测量不需要规定具体测量点，从检测点、控制点上引出信号测量均可。

在振动响应检查（共振探索）期间确定危险频率点时，或比较耐久试验前后的危险频率是否发生变化时，其频率精度要求比较高，通常为：

到 5Hz ±10%或±0.05Hz

从 5Hz 到 100Hz ±0.5Hz

大于 100Hz ±0.5%

在定频试验时，通常为：

到 5Hz ±20%或±0.05Hz

从 5Hz 到 50Hz ±1Hz

大于 50Hz ±2%

12.7 交越点和交越频率

交越点是正弦振动试验包络曲线上的转折点（如图 12-6 所示），交越频率是将振动特性从一种关系变到另一种关系的频率，是由产品的使用环境和振动台能力等综合因素决定的。目前对正弦振动试验可以规定一个交越点（如图 12-4a 所示），也可以规定一个以上的交越点（如图 12-4b 所示），即多个交越点。

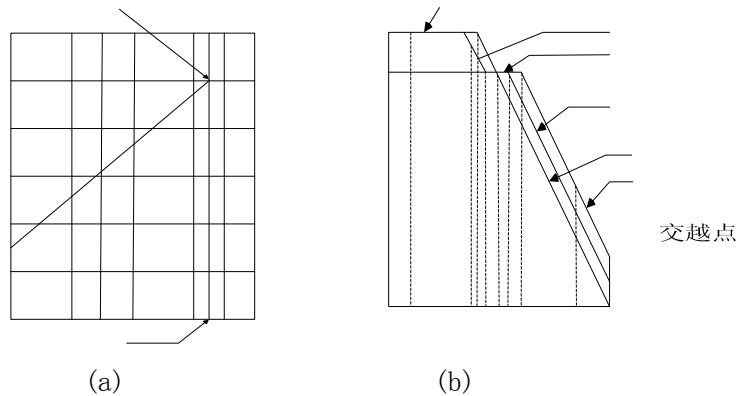


图 12-4 交越频率与交越点

对只有一个交越点的试验，通常是交越点以下定位移。因为上面已说了低频时位移幅值很大加速度很小（而且受到本底噪声的影响），对产品影响的主要是位移量。交越点以上定加速度，因为在交越点以上的位移量很小，加速度幅值很大，根据加速度正比于作用力的原理，此时，对产品影响的主要是加速度量。对有多个交越点的试验，可以是定位移一定加速度一定位移一定加速度等，也可以是定位移一定速度一定加速度等。

对交越频率。有的标准在给出试验等级的同时，直接给出交越频率；有的标准则给出位移幅值和加速度幅值，让使用者自己算出交越频率。对某一具体的试验严酷等级，若有了位移和加速度幅值，如何计算出频率之间的关系可用下式表示：

$$a = 0.004sf^2 \quad (12-9)$$

式中：a—加速度（g）

s—位移（单振幅 mm）

f—频率（Hz）

交越频率

频率（Hz）

由上式 12-9 可见，只要知道其中的二个量，就可以算出第三个量。例如知道位移和加速度的幅值，就可计算出频率值。在扫频试验中，交越频率以下是定位移扫频。即在扫频过程中位移恒定，而加速度幅值将随着频率的增高而增高，到交越频率上正好增加到定加速度扫频时的加速度幅值。此后频率继续增加，位移幅值越来越小，而加速度幅值则恒定不变。可见在交越频率上，位移幅值和加速度幅值都达到了规定值。也就是说在交越点上，用定位移幅值和交越频率代入式（12-9）求出的加速度幅值正好等于定加速度扫频时的加速度幅值。同样，用定加速度幅值和交越频率代入式（12-9）求出的值正好等于定位移的幅值。所以知道了交越点上的位幅值和加速度幅值后，就可根据式（12-9）计算出交越频率。例如电子及电气元件试验方法美军标和国军标中的高频试验的条件 H 为 10-2000Hz, 0.75mm/80g, 其交越频率为：

$$\begin{aligned} a &= 0.004sf^2 \\ 80 &= 0.004 \times 0.75 \times f^2 \\ f &= \sqrt{\frac{80}{0.004 \times 0.75}} = 162(\text{Hz}) \end{aligned} \quad (12-10)$$

162Hz 的交越频率是很高的交越频率。对很高的交越频率，无论是计算出来的，还是选用的，一定要注意试验所用的振动台本身的能力是否能上得去，否则要尽量避免使用，以免损坏振动试验系统。

12.8 加速振动技术

耐久试验，特别是预定频率上的 10^7 次应力循环的耐久试验，往往需要很长时间，有的甚至长达几百小时，例如 10^7 次应力循环在 30Hz 上试验时就需近 100 小时，在 50Hz 上试验时就需近 50 小时，这种情况无论对人，对试验设备，或从经济性和生产效率来说都是个问题。而加速振动是解决这一问题的一个较好的途径。

加速振动是指选用振动试验参数中某一最敏感的参数，使其在某种特定的试验机理支配下，以改变这一参数的量值来缩短试验时间。用增加振动加速度值的方法来缩短试验时间是其中最好的一种方法。

用增加振动加速度来缩短试验时间的方法是从疲劳理论出发的。所谓疲劳是指产品在交变重复载荷（应力）作用下，使损伤不断累积，最后导致破坏的现象。根据疲劳理论，重复载荷在结构上所产生的应力 σ 和应力作用下结构发生破坏的应力循环数，可以画成如图 12-5 所示的曲线。

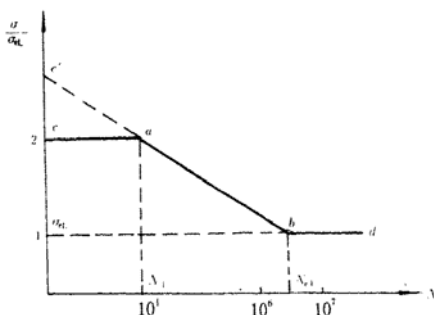


图 12-5 加速振动的典型 σ (A) - N 曲线图

图 12-5 的曲线是实验数据的平均值，通常以对数坐标给出。由图 12-5 可见：

(1) 在一定的应力（例如图中的 σ_1 ）作用下，材料所能承受应力循环数为 N_1 。该 N_1 就称为在 σ_1 作用下的疲劳寿命。如果材料在低于某一特定应力不再发生破坏，即在此应力下材料就可承受无限次应力循环，则该应力就称为材料的极限应力，即图 12-5 中的 σ_{el} 。

(2) 持久极限应力一般在屈服应力的 50%~80%之间，具有代表性的数值为 50% ‘即 $\sigma_{el}=0.5 \sigma_s$ 。所以图 12-5 中的纵坐标以 σ_{el} 标准化，纵坐标为 1 的地方是持续极限应力，纵坐标为 2 的地方为屈服应力。

(3) 静拉伸试验表明，当应变超过 0.4%时，材料就进入塑性状态。此时材料的内应力就超过弹性极限应力，即达到屈服应力，从而产生永久变形。疲劳经验告诉我们，当应变超过 0.4%时，其寿命就小于 10^4 次应力循环。如果把材料看成理想塑性，则当外力增加时应力就不变。也就是材料在小于 10^4 次破坏时，其破坏曲线平行于 N 轴，即图 12-5 中的 ac 段。如果材料不产生屈服，材料在小于 10^4 次时的破坏曲线如图 12-5 中 ac' 段（虚线）。

(4) 如果曲线存在转折点的话，则大都在 $10^6 \sim 10^7$ 之间，美国振动冲击手册取转折点为 10^6 次，即与疲劳极限相对应的破坏循环数为 5×10^6 次，这就确定了图 12-5 中的 b 点。此点说明，材料在 σ_{el} 的作用下，经过 5×10^6 次应力循环还不被破坏，就永远不会在该应力下破坏，这就决定了 bd 段为一平行于 N 轴的直线。

(5) 将材料在 $10^4 \sim 5 \times 10^6$ 次被破坏的实验数据的平均值画在图 12-5 的双对数坐标上则 σ -N 曲线的中间部分（即 a 和 b 点之间的部分）为一直线。

由上面的叙述可见，图 12-5 中的曲线可以作为产品在振动条件下经受疲劳破坏的依据。由图 12-5 中的 ab 段可见，当试验样品所经受到的应力低时，所要求的破坏循环数就多；反过来，当试验样品所经受到的应力高时，所要求的破坏循环数就少，即所需的试验时间就短，这就是加速振动的原理。可见只要将上面叙述的 σ -N 的关系换成 A-N 的关系。

就可用于实际的加速振动试验中。美国振动冲击手册第 24 章对 A-N 之间的关系所推荐的经验公式为：

$$\text{当 } 10^4 \leq N \leq N_{el} \text{ 时}$$

$$\frac{N}{N_{el}} = \left(\frac{A}{A_{el}} \right)^{-K} \quad (12-11)$$

式中：N、A - 曲线上任一点的破坏循环数及相对应的振动加速度
 N_{el} 、 A_{el} - 曲线转折点的破坏循环数（极限破坏循环数）及相对应的振动加速度

K - 大于零的常数

上式表明：对被试产品来说，如果它在原规定的加速度和振动次数发生破坏（不破坏），则按 A-N 曲线提高振动加速度和减少振动次数后同样会出现破坏（不破坏），也就是说，可以保证加速试验与不加速试验的等效性。

如果要将试验时间缩短到原来的十分之一，即 $N/N_{el} = 0.1$ ，则根据公式（12-11），可得：

$$\alpha = \frac{A}{A_{el}} = \text{arc lg} \left(\frac{1}{K} \right) \quad (12-12)$$

式中：α - 加速因子

从（12-11）可见，要将试验时间缩短到原来的十分之一，则试验量值增加为原来的 α 倍。

根据航空部门对许多产品所做的加速振动的验证试验结果，对式（12-11）和（12-12）中的 K 值，取 K=5 比较合适。根据他们的经验和结论，对电工电子等产品的加速振动等级用表 12-1 中的数值比较合适。

表 12-1

加速等级	振动量值增加为原规定值的倍数（α）	振动次数减少为原标准规定值的倍数
1	1.39	1/5
2	1.60	1/10
3	1.84	1/20
4	2.22	1/50
5	2.56	1/100

表中的等级可按下列原则进行选取：

- （1）一般情况下优先选用等级 2
- （2）具备下列条件之一者，选用等级 1
 - a 当按等级 2 进行加速时，由于太快而不能满足试验要求；
 - b 样品的工作性能对振动量级比较敏感，不宜采用等级 2 进行试验；
- （3）同时具备下列条件者可选用等级 3
 - a 结构简单；
 - b 工作性能对振动量值不敏感；
- （4）同时具备下列条件者可选用等级 4
 - a 结构简单；
 - b 工作性能对振动量值不敏感；
 - c 原规定的等级等于或大于 200h；
- （5）若表 12-1 中所规定的等级不适用，则可按下式进行计算，但 α 不能大于 2.56

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{-5} \quad (12-13)$$

式中： A_1 - 未加速的振动量值；
 N_1 - 未加速的振动次数；
 A_2 - 加速后的振动量值；
 N_2 - 加速后的振动次数；

12.9 扫频技术

产品实际所经受到的振动环境，在绝大多数情况下，其振动频率与振幅是在不断变化着的。作为试验室的模拟技术，也是要尽量模拟现场的，但早期的试验设备是实现不了，所以在正弦振动试验中，频率变化的方式由于历史原因，有定频振动（分频率点振动）、线性扫频、分段线性扫频、指数（对数）扫频四种形式。

12.9.1 定频振动（分频率点振动）

定频振动是将整个试验频率范围分成若干个频率点，在整个试验频率范围内用多个振动频率点来代替实际环境中的振动频率与振幅的不断变化，例如每隔 5Hz 一个频率点，或选定若干个频率点（例如对产品敏感的频率点、共振频率点、经常出现的振动频率点等）；然后再将试验时间平均分配到各个频率点上，例如在每个频率点上振动 5 分钟。美国军标 MIL-STD-167 和日本标准 NDS-XF8017 就是采用这种方式，并且每隔 1Hz 一个频率点，功能试验时在每个频率点上振 5 分钟，对共振试验则振 15 分钟。这种方式比较陈旧，是早期正弦振动试验中的一种做法，随着振动控制技术的发展和进步，目前已很少采用了，但有的标准或规范仍保留了这种方法。

12.9.2 线性扫频

线性扫频是在整个试验频率范围内的每个频率上的振动时间相同。目前国内外对家电、船舶等大型设备，由于重量大、频率低，有时仍采用机械振动台来进行试验，而目前有不少机械振动台只能进行线性扫频，所以这种方法还在继续使用。用这种方式进行扫频的缺点是高频段上的振动时间太长，而低频段上的振动时间又太短，激励不充分。

12.9.3 分段线性扫频

分段线性扫频是将整个试验频率范围分成若干频段，然后在每个频段内线性扫频。这种方法主要用于在不能进行指数（对数）扫频，而又要克服线性扫频的缺点的场合。MIL-STD-202F 就规定有这种方法，并且是作为指数（对数）扫频的替代方式用的。即必要时，可将频率范围分成几个频段，但不能减少试验样品所受到的振动应力。在具体运用分段线性扫频方法时，其频段的划分和各频段内扫频速率的确定，应尽量使其符合频率随时间按指数规律变化这一原则。在具体操作时，通常为每个频段的最高频率和最低频率之比不应小于 2、每个频段内的扫频速率应恒定、在各频段内取一频率点，观察所取各频率点上的振动次数是否大致相同。

12.9.4 指数（对数）扫频

指数（对数）扫频是指频率随时间按指数规律变化。指数扫频的优点是各频率上的振动次数近似相同，这样就便于比较和分析正弦振动对产品的影响。

在正弦振动试验中，当试验的频率范围、扫频速率已知时，试验时间可以根据下式（12-14）进行计算：

$$T = 6.644 \lg \left(\frac{f_2}{f_1} \right) \quad (12-14)$$

式中： T - 每一扫频循环（ $f_1 \rightarrow f_2 \rightarrow f_1$ ）的时间，单位为分钟；

f_1 - 下限频率;
 f_2 - 上限频率;

12.10 试验控制技术

12.10.1 单点与多点控制试验技术

在振动试验, 可采用单点控制, 也可采用多点控制, 如图 13-6a 和图 13-6b 所示:

单点控制比较简单, 对已知或能证实各固定点是同相并沿平行直线运动的试验, 用单点控制比较适合, 具体运用时, 对一些小型的动态特性不复杂的样品用单点控制更合适。在进行单点控制时, 必须同时监测其它检测点上的信号, 看其是否与控制点信号的相差在试验规定的容差范围内, 如不在要采取调整措施以保证达到试验规定的容差范围。对一些体积大、动态特性比较复杂的设备, 由于振动台台面本身振动量值的不均匀性和样品复杂动态特性对台体的影响, 往往会造成试验结果的误差大和再现性差的问题。所以用多点控制比较合适。

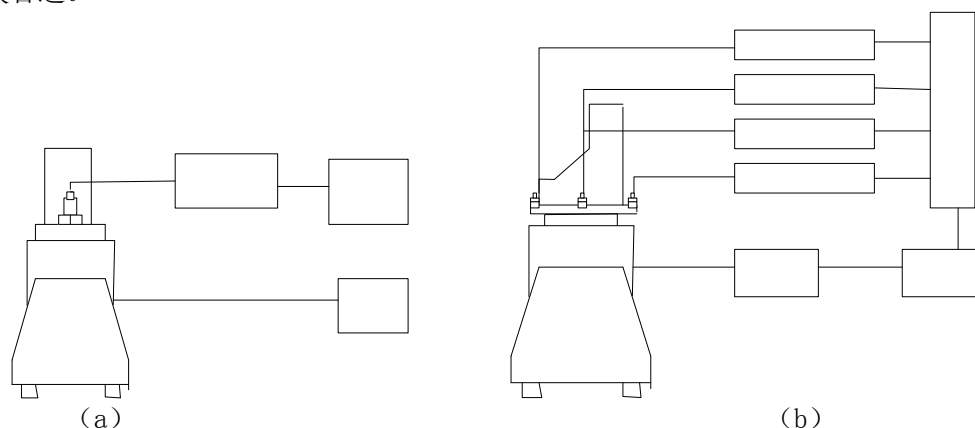


图 12-6 单点与多点控制示意图

多点控制是用来自各检测点上的信号作控制信号的, 可以为各检测点上信号的平均值, 也可为其某检测点上的信号值, 例如最小信号那个检测点上的值等。用平均值控制, 其控制信号是虚拟的。用最小信号那个检测点上的值控制, 多用在重要的军品或一次有效等设备上, 因为它要保证样品的任何部分所经受到的振动应力都不能低于试验规范中的要求。用最大值控制应选用样品对振动最敏感那部位的传感器上的信号来控制。在此还应注重, 对相对于振动台 (含水平滑台) 体积大、重量重、动态特性复杂的样品应尽量采用多点平均控制, 并且不能都采用夹具与样品上传感器上的信号来控制, 必须有 1~2 安装在台体上的传感器上的信号, 否则搞不好会造成对振动台的损坏。

12.10.2 跟踪滤波器技术

在正弦振动试验中, 如果振动波形的失真大, 测量系统将显示不出正确的振幅值, 因为它既包括了所需的基本频率 (基波), 又包含了许多不需要的其它频率成分 (高次谐波)。这就会导致在所需的基本频率上产生低于规定的振幅值。如果低得没有超过容差范围, 则是允许的。如果超过, 则必须设法把基波幅值恢复到所需值, 否则就很容易产生欠试验。使基波幅值恢复到所需值的方法很多, 使用跟踪滤波器是一种方法。这种仪器的特点就是它的中心频率能随扫频时的激励频率同步变化, 从而进行有效的滤波, 以达到把基波幅值控制到的规定的严酷等级上, 从而保证样品能经受到所规定的振动应力。然而跟踪滤波器的使用也受到一定的限制。这主要表现在幅值被恢复到正常值时, 那些不必要的高次谐波

成分也随之增加，如果这些高次谐波成份对样品也有影响，则必须会对产品产生附加的高应力，其结果又会使样品过试验。所以只能用在高次谐波对其影响不大的样品上。另外随着基波被恢复，高次谐波成份的增加，失真也必然增加，可见此时就有可能要放弃对失真的要求。

12.10.3 用驱动力控制振动试验技术

当一个样品在其共振频率上被激励时，若其视在质量高于它的工作安装结构（包括振动台的活动部分）时，应考虑试验样品对试验台体的反作用，此时用驱动力控制振动试验是一种较好的方法。

现假设有一样品，其质量为 2 千克，安装结构（夹具加动圈）为 5 千克，样品的共振频率 50Hz，振动台面的激励加速速度为 5g，共振时的动态系数为 3。

当样品共振时，实际上所受到的振动加速度（响应加速度） $a=3 \times 5=15g$ ，此时样品的运动力 $F=ma=2 \times 15=15Kg$ 。如果仍按台面的 5g 计算，则相当于 $30 \div 5=6$ 千克的样品在起作用。这 6 千克的视在质量，既为实际起作用的质量，可见它高于安装结构的 5 千克的质量。

在共振时，当样品的视在质量高于它的安装结构时，其样品和台体振动的相位要相差 90 度，所以样品对台体的反作用力是很大的。此时就振动台而言，就需要相当大的功率输入，而且动态放大系数愈大，这种情况就愈严重，采用驱动力控制（力传感器）可以作为解决这一问题的途经。

12.10.4 带减震器样品的试验

对带有减震器的产品，一般应连同减震器一道进行试验，如果被产品和其它产品一道安装在一个公共的系统中，从而造成不能使用原有的减震器进行试验时；或当带减震器的产品在试验时没有合适的减震器可用时，则必须修改原振动量级，以不同的振幅进行不带减震器的试验。其振幅的大小可根据在整个试验频率范围内减震器在每条轴线上的传递特性来确定。如果原有的减震器的特性未知，则可根据减震器的通用特性曲线来确定，以便给样品提供一个更符合实际的振动输入电平。图 12-7 中的 A、B、C 三条是 IEC 标准和正弦振动试验国标中减震器的传递特性曲线，第四条 D 是当前国内生产的无谐振峰减震器的传递特性曲线。

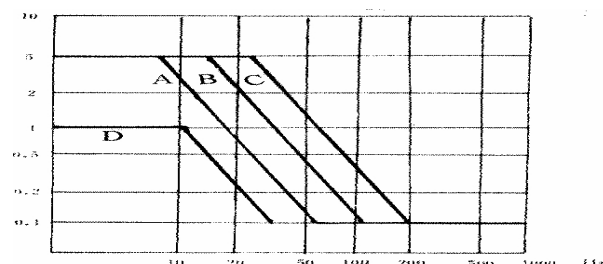


图 12-7 减震器的传递特性曲线

由图 12-7 可见：

曲线 A 适用于固有频率（考虑单自由度系统）不超过 10Hz 的减震器。

曲线 B 适用于固有频率（考虑单自由度系统）在 10-20Hz 范围内的减震器。

曲线 C 适用于固有频率（考虑单自由度系统）在 20-35Hz 范围内的减震器。

曲线 D 适用于无谐振峰的减震器。

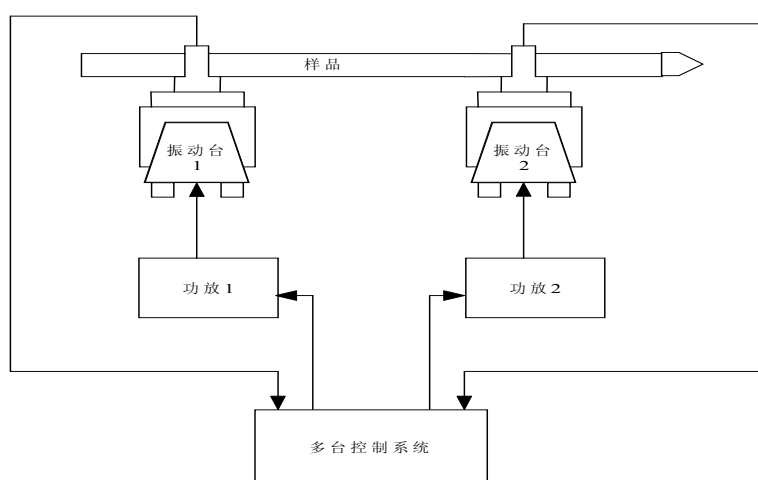
根据上述四条减震器的传递特性曲线，就可求出去掉减震器后实际所需的振动量级。其方法是从四条减震器特性曲线中选择一条最适合样品的曲线，然后将规定的振动量值乘以在整个频率范围内的传递系数。当然这样得出的振动量级很可能是在试验室内无法重现的数值。如果是这样，可取最大的振动量级作为整个试验频率范围内的振动量级。例如有

一需要进行 20-2000Hz、10g 正弦振动试验的样品，其减震器的传递特性曲线符合图 12-7 中的曲线 A，在 20-2000Hz 范围内最大传递系数为 0.75，则去除减震器后的试验量级为 $10 \times 0.75 = 7.5g$ 。如果该产品的试验频率范围不是 20-2000Hz，而是 10-2000Hz 则根据传递特性曲线 A，最在的传递系数为 3，此时应进行 $10 \times 3 = 30g$ 的试验。这样做应力的确太大，但可以分频段进行。例如分为 10-40Hz、40-2000Hz 二个频段，其中 10-40Hz 频段为 $3 \times 10 = 30g$ ，在 40-2000 频段为 $10 \times 0.2 = 2g$ 。

图为 12-7 中的四条减震器传递特性曲线除作上述用途外，还可作为减震器设计、研制、生产的依据，也可作为产品抗震设计时选择减震器的依据。在作这样两种依据时，曲线 D 和 A，由于代表固有频率在 10Hz 以下的减震器，所以适合作为安装在运载工具上使用的产品的减震器用。曲线 C 由于代表 20-30Hz 频率范围内的减震器，而该频率范围正好落在产品在运输和使用中经受遇到的频率范围内，所以对曲线 C，建议仅用于某些固定场合上安装使用的产品的减震器。例如安装在发动机傍使用的产品上的减震器，而该发动机的振动频率是固定的，而且是超过 35Hz 的。

12.10.5 双台并激与多台并激振动试验

虽然随着科学技术的发展，振动台的推力和台面的尺寸已愈来愈大，国内外已研制出 10 吨、16 吨、20 吨、30 吨等大推力振动台，但仍存在由于样品的体积和/或重量（例如大型人造卫星）太大而无法在一个振动台上进行试验的问题；同时也仍存在着样品重量不大，但长度方向的尺寸太长（例如运载火箭）而无法以一个支点（相对长度而言），也无法用一个很长的夹具来支撑进行试验的问题。在这种情况下就需要用二个振动台或多个振动台进行双台并激与多台并激的振动试验。下图 12-8 为双台并激振动试验的示意图。



1. 双台并激振动试验系统的特点：

A. 交叉耦合问题：

两个振动台之间的交叉耦合是双台并激中必须解决的主要问题。例如，振动台 1 受到激励，振动台 2 没有激励，但由于二者通过试件联接，振动台 2 的实际振动响应可能比振动台 1 还要大。控制系统必须消除两个振动台之间的交叉耦合，使各个振动台的控制点响应加速度分别达到各自的设定要求。

B 夹具设计

试验系统由振动台，夹具，试件和控制系统组成。相对单台系统，夹具的结构设计更复杂和重要。

在双台并激的情况下，如果双台间距不大，要求双台相位差也不大，则振动台承受横向力不大，可直接用环形钢箍将试件和台面连接。

在某些情况下，如要求双台相位相反，试件刚度较大，振动台承受横向力距很大，振动台和试件之间要使用带油膜的万向连接器。以减低振动台所承受的横向力距。

C. 振动台：只要具备较好的抗横向力性能，一般振动台均可做双台并激振动试验。但要求功放燥声小，动态范围大。

D. 控制系统各通道相位差要小（如 1—2 度），测量系统灵敏度要高，否则，双台相位差无法控制。

第 13 章 随机振动试验

13.1 试验目的、影响机理、失效模式

产品在运输和实际使用中所遇到的振动，绝大多数就是随机性质的振动（而不是正弦振动）。例如，宇航器和导弹在发射和助推阶段的振动；火箭发动机的噪声和气动噪声使结构产生的振动；飞机（特别是高速飞机）的大功率喷气发动机的振动；飞机噪声使飞机结构产生的振动和大气湍流使机翼产生振动；飞机着陆和滑行时的振动；车辆在不平坦的道路上行驶时产生的振动；多变的海浪使船舶产生的振动等等都属于随机性质的振动。因此，随机振动试验才能更真实反映产品的耐振性能。

随机振动和正弦振动相比，随机振动的**频率域宽**，而且**有一个连续的频谱**，它能**同时****在所有频率上对产品进行激励**，各种频率的相互作用远比用正弦振动仅对某些频率或连续扫频模拟上述振动的影响更严酷更真实和更有效。另外，用随机振动来研究产品的**动态特性**和**结构**的传递函数比用正弦振动的方法更为简单和优越。

随机振动和正弦振动一样能造成**导线摩擦、紧固件松动、活动件卡死**，从而破坏产品的**连接、安装和固定**。当随机振动激励造成的应力过大时，会使结构产生裂纹和断裂，特别在严重的共振状态下更为显著。长时间的随机振动，由于交变应力所产生的累积损伤，会使结构产生疲劳破坏。随机振动还会导致**触点接触不良、带电元件相互接触或短路、焊点脱开、导线断裂**以及产生**强电噪声**等。从而破坏产品的正常工作，使产品性能下降、失灵甚至失效。

为了能在试验室内模拟产品在现场所经受到的实际随机振动及其影响，工程技术人员为此付出了许多的努力。早在六十年代，国际上对随机振动的研究就十分活跃。不仅在理论上有了重大突破，而且有了较完善的试验方法和试验设备。1962 年美国军标 810 中首先规定了随机振动试验方法。1964 年英国国防部标准 07-55 中也提出了随机振动试验。1973 年 IEC 公布了四个具有不同再现性宽带模拟式随机振动试验方法，到上世纪 90 年代又公布了数字式随机振动试验方法。目前国内的随机振动试验已很普及，随机振动试验设备，特别是一般用途的**随机振动控制仪**价格也不高。

13.2 随机振动的描述

在随机振动试验中，由于振动的质点处于**不规则的运动状态**，永远**不会**精确的**重复**，对其进行一系列的测量，各次记录都**不一样**，所以**没有任何固定的周期**。在任何确定的时刻，其振幅、频率、相位都不能预先知道，因此就不可能用简单的周期函数和函数的组合来描述。图 13-1 为典型的宽带随机振动时间历程。

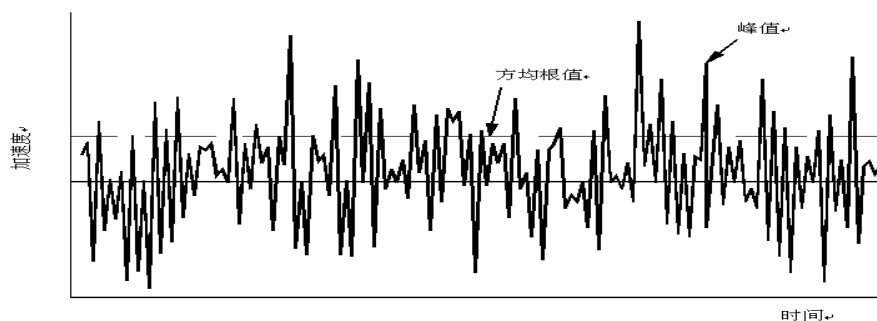


图 13-1 典型的宽带随机振动时间历程

由图 13-1 可见，随机过程最明显的特点是**非周期性**，瞬时值无法预测；但并非无规律可言，而是表现出**统计规律性**。因此对随机信号的研究，处理和分析必须用**统计的方法**来进行。对某一随机过程，通常用下列四个方面的信息来描述它：

时域：有平均值、均方值、均方根值、方差等。

幅值域：有概率分布、概率密度等。

时差域：有自相关函数、互相关函数。

频率域：有自功率谱密度、互功率谱密度、频率响应函数以及相干函数。

随机过程有平衡的和非平稳的，有各态历经的和非各态历经的。有正态分布的和非正态分布的。在随机振动试验的范畴内，通常**假定**为平稳的、各态历经的，并且是正态分布的。所以本文的叙述都是从这一假定出发的。

13.2.1 时域信息

(1) 平均值

它描述一随机变量或一组数据的平均状态。在数理统计和概率论中，此值称为**数学期望**，表示随机变量的位置特性。其数学表达式为：

$$\bar{X} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (13-1)$$

在随机振动理论中，通常将平均值取为零，所以在随机振动试验中此值**不常用**。

(2) 方均值

在随机振动试验中，方均值表示试验能量的大小，由于平均值取为零，故方均值就是**方差**，它描述一随机变量或一组数据在平均值周围的**分散性**，即在平均值上下的波动大小。其数学表达式为：

$$\overline{x^2} = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (13-2)$$

(3) 方均根值

它描述一随机变量或一组数据在平均值周围的**集中程度**。在随机振动理论中，由于将平均值取为零，所以方均根值就是**标准偏差**。其数学表达式为：

$$\sqrt{\overline{x^2}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (13-3)$$

此值在随机振动试验中表示有效幅值的大小。

13.2.2 幅值域信息

(1) 幅值的概率分布

幅值的概率分布是描述随机振动瞬时幅值低于某一特定值的概率，它**与**幅值概率密度一道描述了随机振动瞬时幅值大小的分布规律。典型的幅值概率分布曲线如图 13-2 所示：

$P(x)$

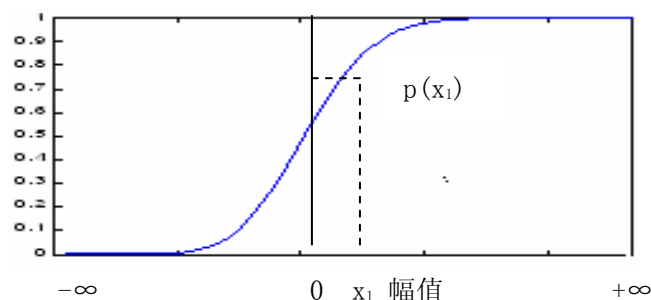


图 13-2 幅值的概率分布曲线

由图 13-2 可见, $P(x)$ 是幅值 x 的函数。幅值小于 x_i 的概率为 $P(x_i)$, 幅值趋于正无穷大的概率 $P(+\infty) \leq 1$, 幅值趋于负无穷大的概率 $P(-\infty) \geq 0$, 所以幅值的概率分布范围为 $0 \leq P(x) \leq 1$, 该分布主要用于对随机信号的分析 and 研究中, 而在随机振动试验中不常用。

(2) 幅值的概率密度

幅值的概率密度表示随机振动瞬时幅值落在某一区间内的概率。在随机振动试验中, 幅值的概率密度曲线为正态分布曲线, 并且平均值为零。为了分析方便, 通常还将标准偏差 σ 规范化为 1。其数学表达式为:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (13-4)$$

幅值的概率密度曲线如图 13-3

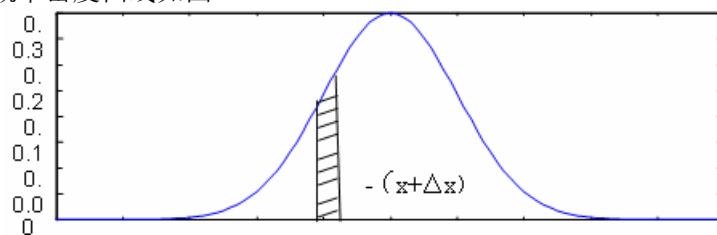


图 13-3 正态分布概率密度曲线

由图 13-3 可见, 概率密度曲线下的面积为 1, 所以通过概率密度曲线就很容易知道某瞬时幅值出现的概率, 例如瞬间幅值为图 13-3 中的 $-(x+\Delta x)$ 的概率, 就是概率密度曲线下那个长方条的面积。同时由图 13-3 还可以看出, 随机振动的瞬间值大于 3 倍方均根值 ($+3\sigma$) 和小于 3 倍方均根值 (-3σ) 出现的概率非常小, 约占 0.26%。在 $+3\sigma$ 和 -3σ 之间出现的概率十分大, 约占 99.74%, 这就是通常把 3σ 值作为随机振动试验最大幅值的依据。当用磁记录仪和数据采集器记录随机振动信号时, 要保证 3σ 的瞬间幅值不削波。另外, 随机疲劳计算时的最大加速度量级也是以 3σ 值为依据的。rms 值就是标准偏差 σ 值, 当将标准偏差 σ 规范化为 1 时, 则这里的 3σ 均表达为 3σ 。

13.2.3 时差域信息

上述的平均值、方均值、方均根值、幅值的概率分布、幅值的概率密度充分描述了随机振动在时域和幅值域中的各种信息, 但没有给出频率含量与时间历程之间的信息。这些信息是在自相关函数和互相关函数中给出。

(1) 自相关函数

随机过程 $X(t)$ 的自相关函数定义为在时刻 t 和时刻 $t+\tau$ 的随机变量乘积的平均值, τ 是时移, 当平均时间 $T \rightarrow \infty$ 时, 平均值的极限便是自相关函数, 其数学表达式为:

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \quad (13-5)$$

自相关函数描述了随机信号在特定时刻的瞬时值如何取决于先前出现的瞬时值。它反映了随机信号本身在不同时刻的相互关系，即间隔时间两侧的随机信号的相互依赖关系，从而在时差域上建立任何时刻的随机量值对未来量值的影响。

自相关函数在随机振动中的**主要应用**为：

自相关函数可以用来**判别是否为宽带随机信号**，这是因为对于宽带随机信号来说，当时移 τ 非常小时， $x(t)$ 和 $x(t+\tau)$ 相差很小的概率很大，这时 $R_x(\tau \rightarrow 0)$ 值非常大，表示关系密切。特别当 $\tau=0$ 时， $R_x(\tau=0)$ 值最大，等于方均值，表示完全相关。当时移 τ 较大时， $x(t)$ 和 $x(t+\tau)$ 相差很小的概率很小。作平均计算正负抵消， $R_x(\tau)$ 值很小。并且随着 τ 值的增大， $R_x(\tau \rightarrow \infty)$ 值很快衰减到零，表示 $x(t)$ 和 $x(t+\tau)$ 之间没有依赖关系，说明对一般的随机振动，时间间隔很远的二个随机量之间不存在任何固定关系。宽带随机信号的自相关函数如图 13-4 所示：

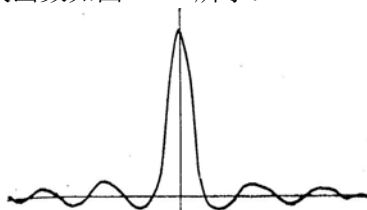


图 13-4 宽带随机的自相关函数

自相关函数可以把随机信号中的周期成份检测出来，这是因为任何周期信号在所有的时移上都有一定形状的自相关函数图形。例如正弦波的自相关函数为余弦形函数，在所有的时移上具有与正弦波一样的周期（相位角信息消失了）。所以对周期信号来说，因为它经过一个周期后又精确的重复过去的时间历程，因此当时移超过该周期时，其自相关函数必然重复前一段的形状。所以若在自相关函数图上发现时移趋于无穷大， $R_x(\infty) \neq 0$ ，而有某种周期性，则说明该随机振动信号混有周期信号成分。

自相关函数通过**福里叶转换**可以得到**自功率谱密度**，用这种方法易于测量和分析，所以它是随机振动试验的基础与基本参数。

(2) 互相关函数

互相关函数表示一随机振动信号 $x(t)$ 在 t 时刻的值和另一随机振动信号 $y(t+\tau)$ 时刻值乘积的平均值，它与自相关函数一样，同样是时移的函数。它表示了二个随机振动信号之间的依赖性。互相关函数的数学表达式：

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (13-6)$$

在随机振动试验中，利用互相关函数，可以确定一随机振动信号通过一给定系统所需的时间。因为信号在系统中的时间滞后值，可以通过输入和输出的互相关函数中的峰值位置来确定。互相关函数最大值偏离坐标中心位置的时间坐标移动值，就是信号通过系统的所需时间。如果一线性系统的输入通过几个通道输出，利用互相关函数的时移，可以确定那个通道的传输是主要的。互相关函数通过**福里叶转换**可以得到**互功率谱密度**。

13.2.4 频率域信息

(1) 自功率谱密度

功率谱密度是描述随机振动信号各频率分量所包含的功率，在频率域是如何分布的，是随机振动在频率域上的一种统计特性。

在正弦振动试验中，振动的频率和幅值都是确定的，所以振动的功率（能量）是很清楚

的，也是很好计算的。而随机振动由于振动的时间历程是明显的非周期性，所以必须用功率谱密度（方均谱密度）来计算。

随机振动信号可以看作由无限多个简谐运动组成，因此随机振动信号的功率谱便是在给定频率范围内简谐振动功率之和。简谐振动的功率正比于幅值的平方，所以在指定频率上，随机振动信号的功率谱密度为：

$$PSD = \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta f \rightarrow 0}} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{x^2(t)}{\Delta f} dt \quad (13-7)$$

上式可见，在指定频率上的功率谱密度就是信号在 Δf 中的方均方值的平均值。理想的情况是，平均时间无限长，滤波器的带宽无限窄，这实际是不可能的，因此通常是用有限平均时间和有限带宽，这样 $PSD = \overline{x^2} / \Delta f$ （方均值/单位间隔频率，故也称方均谱密度）。

功率谱密度在频率范围内的变化形式，即功率谱密度对频率的图型，称功率谱密度的频谱。功率谱密度的频谱还可以这样理解：如果将随机振动信号分割成许多小频带 Δf ，并在每个频带上测出方均加速度值，然后除以 Δf ，并令 $\Delta f \rightarrow 0$ ，这时所得的函数称功率谱密度的频谱。由于**功率谱密度**的单位为 g^2/Hz 即**每单位频率上的加速度值的平方**，所以在随机振动试验中又称**加速度谱密度**，功率谱密度的频谱又称加速度谱密度的频谱。功率谱密度（加速度谱密度）的单位由 g^2/Hz 和 $m^2/s^4/Hz$ 二种表达形式，它们之间的关系为 100 倍的关系，即 $1g^2/Hz=100m^2/s^4/Hz$ 。

功率谱密度除用作提供频率域的信息外，还可以用来分析产品的动态特性、研究疲劳损伤、判别共振等，例如通过功率谱密度可以判明安装在运载工具上使用的产品所经受到的诸振动中，那一种是主要的，那一种是可以忽略的，从而易于对产品进行设计改进。

（2）互功率谱密度

互功率谱密度描述两随机振动过程之间的频率信息，它不仅能提供按频率分布的能量大小，还能提供二信号之间的相互关系。从互功率谱密度中，我们可以得到系统的频响函数，可以确定振动响应与对其激励的时间关系。

上面介绍了如何用时域、幅值域、时差域和频率域的信号描述随机振动。而当前在试验内模拟现场随机振动，重现的主要是现场随机振动的有效频率成份（频率范围）、功率谱密度（加速度谱密度）、总均方根加速度，即保证这三个参数来自现场振动。但在具体进行随机振动时，振动台面的运动仍是随机振动的时间历程。该时间历程应该是现场随机振动时间历程的典型代表等。

13.3 随机过程

按功率谱密度频谱的形状，即按随机过程的频率结构，产品现场出现的随机振动主要有下列形式：

（1）宽带随机振动

宽带随机振动是指振动的能量分布在一个较宽的频率范围内的振动，一般运载工具，特别是空中运载工具，典型的是喷气式飞机的振动，他们所产生的振动属于宽带随机振动。

（2）窄带随机振动

窄带随机振动是指振动的能量分布在一个较窄的频率范围内的振动，例如螺旋桨飞机由于螺旋桨叶转动时所带动的的旋转压力场将产生窄带随机振动，窄带随机的中心频率是螺旋桨叶的通过频率及其谐波（一般到 4 阶），其窄带带宽为其通过频率（中心频率）及其各次谐波的 $\pm 5\%$ （漂移）。

(3) 宽带+窄带随机振动

上面讲的螺旋桨飞机,除窄带随机振动外,更主要的是各种振源引起的宽带随机振动,所以螺旋桨飞机的振动是宽带+窄带随机振动。又如安装在履带车辆上使用的和通过履带车辆运输的产品,通常会经受到以宽带为主+窄带的随机振动。宽带随机振动来自车辆的基本运动、支承系统、路面不平。窄带随机振动来自履带拍击地面的运动。

(4) 宽带随机振动+周期振动

宽带随机振动+周期振动是指在宽带随机振动上叠加正弦振动,直升飞机的振动往往是在宽带随机振动的基础上叠加很高的正弦振动。宽带随机振动来自直升飞机的各种振源,正弦振动是由直升飞机的旋转部件产生的,如主旋翼、尾旋翼、发动机和变速箱的振动。

13.4 随机振动试验条件

13.4.1 随机振动试验的试验条件(严酷等级)参数

随机振动试验的试验条件(严酷等级)是由试验频率范围(Hz)、功率谱密度(g^2/Hz)、功率谱密度的频谱、总均方根加速度(G_{rms})、试验时间四个参数组成。

(1) 试验频率范围

频率范围是指产品安装平台的振动对产品产生有效激励的最高频率和最低频率之间的频率。典型的低频通常是取产品最低共振频率的一半或其安装平台产生明显振动的最低频率;典型的高频是产品最高共振频率的两倍或其安装平台产生明显振动的最高频率,或是可以有效地、机械地传递振动的最高频率。通常认为机械传递的振动的最高频率是取2000Hz,尽管实际上常常会更低。如果需要2000Hz以上的频率,通常需要用噪声来进行。

(2) 功率谱密度(g^2/Hz)和功率谱密度的频谱

随机振动是以定义在相关频率范围内的PSD功率谱密度(ASD加速度谱密度)及功率谱密度的频谱的形式来表征。功率谱密度(加速度谱密度)是指单位频率上的能量,功率谱密度的频谱(加速度谱密度的频谱)是指振动能量在整个频率范围内的分布。

(3) 总均方根加速度(G_{rms})

大家在谈到随机振动试验的试验条件(严酷等级)时,通常或习惯会用总均方根加速度(G_{rms})来衡量随机振动试验条件的高低或严酷程度,严格来说是不对的,也就是用 G_{rms} 值来规定振动条件是不对的,因为总均方根加速度(G_{rms})值是功率谱密度的频谱在全频段范围内面积的积分,即方均根值,它不包含任何频率信息。因此 G_{rms} 值通常用来进行试验误差控制与检测,以及根据试验样品的重量、体积、动态特性来选需多大推力(功率)的振动台。

从上述的叙述可见,评价随机振动试验应力大小的真正判据应该是“在给定频率范围内的加速度谱密度高低,即看随机振动试验的**加速度谱密度频谱曲线**,而不是看总均方根加速度(G_{rms} 值)的高低”。对这一点,无论是GJB150还是GJB899在给机载设备振动应力时,一般只给出加速度谱密度,从不给出总均方根加速度(G_{rms} 值)。

(4) 试验时间

试验时间就是进行随机振动的持续时间,通常分为功能(性能)和强度(耐久)二种试验时间。对空中运载工具及空中运载工具上使用的设备,耐久试验的时间通常为功能试验时间的1.6倍。

13.4.2 随机振动试验条件要求

与其它环境试验项目一样,对元器件和货架产品(除特殊订货和特殊要求),一般都采用标准中的系列化的试验条件(严酷等级),对军品和新品应采用产品实际安装平台的振动

条件。下面就以后者的事例此来说明随机振动试验的条件要求。

(1) 宽带随机振动

目前试验室进行的随机振动试验大都是宽带随机振动, 下面是来自 GJB3493 军用物资运输环境条件中解放与东风卡车、60T 火车、IL76 喷气运输机装货底板（货舱底板）测得的宽带随机振动谱及其用于设计输入和验收考核的宽带随机振动要求。该军标实际是由总装提出、军标中心组织、汇集全国电子、航空、船舶、交通等部门共同制订的。

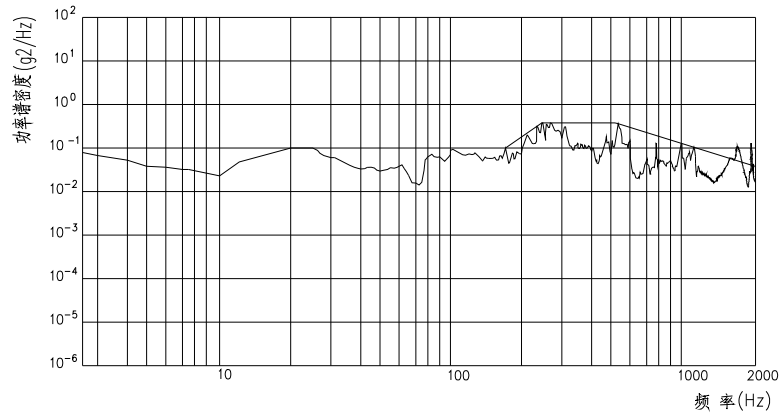


图 13-5 喷气运输机运输垂直方向的宽带随机振动谱

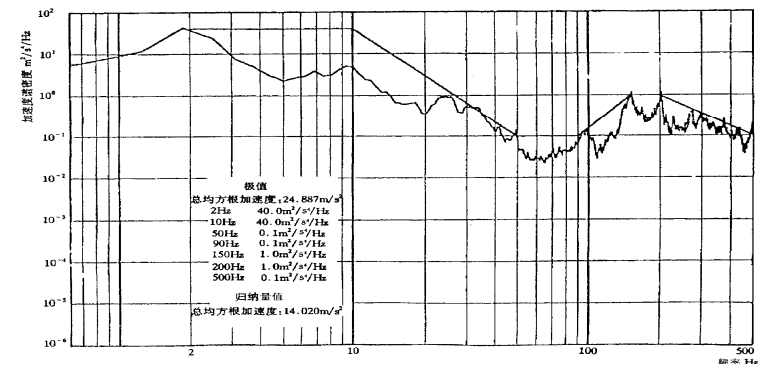


图 13-6 汽车野战运输垂直方向的宽带随机振动谱

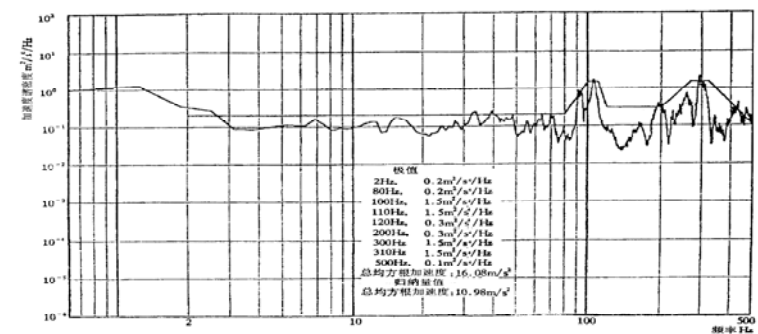


图 13-7 铁路运输垂直方向的宽带随机振动谱

从上面的图 13-5、图 13-6、图 13-7 可见，图中的曲线是运输工具经数据分析、处理、归并（极值包络）出来的频域振动曲线，从图中可以看出该振动曲线可以作为设计输入，但过于复杂，不能作为试验室的试验考核要求。图 13-5、图 13-6、图 13-7 的折线是对图中的曲线进行规范化处理得出的，一看大家就知道，这就可以作为试验室进行随机振动试

验考核时的条件要求了（即输入**随机振动控制仪**的数据）。

(2) 扫描随机振动

扫描随机振动试验是指用窄带随机扫过试验所规定的频率范围的试验。其主要试验参数是频率范围、功率谱密度、扫描频速度。扫描随机振动试验主要用在振动台的随机激振能力，不能满足宽带随机振动试验要求的情况下，这是因为扫描随机振动试验最显著的优点是**振动台的总输出都集中在窄带上**，因此它可以完成比宽带随机振动试验更高能级的试验，其缺点是由于扫描随机振动顺序地逐个激励样品的共振区，这对暴露二个和二个以上的同时共振才能出现的故障是欠缺的。扫描随机振动试验的试验频谱图如图 13-8 所示：随着我国试验设备的发展和普及，以及许多单位大推力振动台愈来愈多，**这种试验愈来愈少做了**。

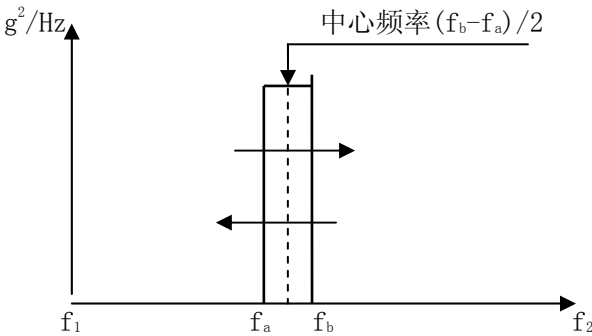


图 13-8 扫描随机振动试验频谱图

(3) 宽带随机振动+正弦或（窄带）组合随机振动试验

这种组合随机振动试验是以宽带随机振动谱为基础，再加上一个和多个离散的单频正弦振动峰值（或窄带随机振动谱），其振动试验谱型如图 13-9 和图 13-10 所示：

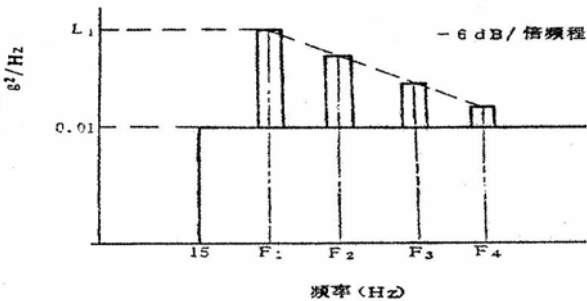


图 13-9 螺旋桨飞机的宽带+窄带随机振动试验频谱图

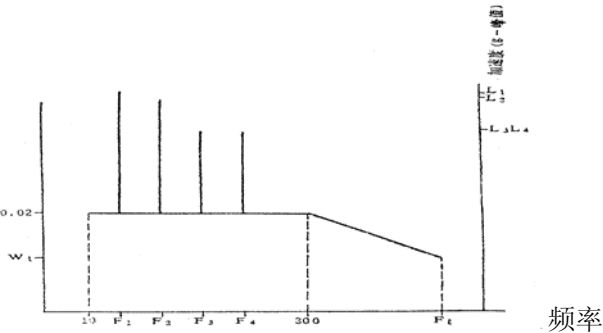


图 13-10 直升飞机的宽带+正弦随机振动试验频谱图

对宽带+窄带组合的随机振动试验，要求随机振动控制仪能把整个试验均衡成预定的宽带随机振动谱+预定的若干单频正弦（若干窄带），还要把输出控制在所要求的总均方根加速度等级上。

对宽带+窄带组合的随机振动试验在进行试验输入设定时有多种方法，一种是先设宽

带，再设窄带，然后将其合成，另一种也可将窄带作为宽带的一部分按设定宽带的办法来设定。用前者的办法设定，其窄带可在整个宽带频率内扫描；用后者的办法设定，其窄带不能在整个宽带频率内扫描，然而宽带+窄带扫描一般的随机振动控制仪做不到，需要工作站式的随机振动控制仪。

对宽带+正弦组合的随机振动试验在进行试验输入设定时先分别单独设宽带和正弦，然后再合成。在做这种宽带+正弦组合的随机振动试验时，由于正弦容易失真，而且将宽带+单频正弦转换成驱动振动台振动的时域信号时逆福里叶计算量大，控制信号差，在做这种试验时要用矩形的带宽愈窄愈好的固定滤波器和跟踪滤波器，其中固定滤波器用于宽带+固定正弦的试验，跟踪滤波器用于宽带+正弦可以在宽带频率范围内扫频的试验，实际由于滤波器的带宽不可能无限窄，所以实际做出的宽带+正弦随机振动试验谱图，其正弦往往不是一条直线。而是一条尖峰，对这种尖峰工作站式的随机振动控制仪副瓣小，而用一般的随机振动控制仪尖峰底部会更宽一些，会类似于频率范围很窄的窄带。

13.5 对试验设备的要求

随机振动试验用的是统计特征参数，并且是通过这些特征参数产生所要求的随机振动试验时间历程来对产品进行试验的。随机振动控制仪有一白噪声发生器，在进行试验前的随机振动试验设定时，按设定的频率范围（试验要求的）给出该频率范围的白噪声，然后按设定的功率谱密度的频谱（试验要求的），使白噪声在各频率上的能量按功率谱密度的频谱产生变化，即形成试验要求的功率谱密度频谱曲线。该曲线是频域信号，它还必须通过控制仪的逆福里叶变换变成推动振动台台体运动的时域信号。应该说我们在现场感觉到的随机振动是时域信号，其幅值是随着时间不断变化的，但该某时段的时域信号是无法代表产品在全寿命周期中所遇到的各种不同频率范围和不同振幅的随机振动，所以必须将全寿命周期中所遇到的各种时域信号利用频域的统计特征参数，将其转变成频域信号，即试验规范中的：试验频率范围（Hz）、功率谱密度（ g^2/Hz ）、功率谱密度的频谱。在进行试验室随机振动试验时将频率范围（Hz）、功率谱密度（ g^2/Hz ）、功率谱密度的频谱输入控制仪，然后由控制仪通过逆福里叶变换还原成现场振动的那种时间历程来推动振动台体运动。

与正弦振动试验一样，对随机振动试验系统的要求，不是指振动试验系统技术条件中的技术指标要求，而是指试验台装上样品（包括夹具）后进行试验时，在固定点、检测点和控制点上的要求。这些要求有：

（1）基本运动

与正弦振动试验要求一样，随机振动台体被激励时，样品各固定点应尽可能产生如图 13-1 所示的同相并沿平行直线运动，并且试验样品各固定点的基本运动应具有大体相同的运动。

（2）瞬时加速度的分布

随机台对样品激励时，控制点上的瞬时加速度的分布应为标准正态分布（若各检测点的运动很难达到完全相同时，则应采用多点控制），如下图 13-11a 所示。一般来说，实际得到的概率密度曲线与标准的标准正态分布曲线相比，其最大值不应超过 10%，对大多数随机试验系统都能达到这一要求，对一些特别重要的试验需要验证。如果使用虚拟的控制点进行控制，所有用来构成加速度谱密度的控制点都应满足此分布。

如果试验频率范围内低频段（如低于 20Hz）的加速度谱密度很高时，其峰值位移可能会超过振动设备的能力（51mm 峰峰值），在这些情况下，有必要减少峰值因子到一个合适的量级，以便产生可接受的峰值位移。一般是减少（削波）到最大峰值与方均根值之比在

2. 5 倍到 3 倍之间，下图 13-11b 是削波后的瞬时加速度的分布。可见峰值因子或者信号削波量级限制了宽带随机过程的瞬时值，对于正态分布随机振幅，如果采用 2.5 的峰值因子，则大约 99%瞬时驱动信号直接施加于功率放大器。

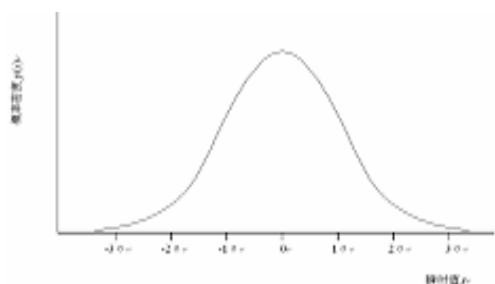


图 13-11a 瞬时加速度的标准正态分布

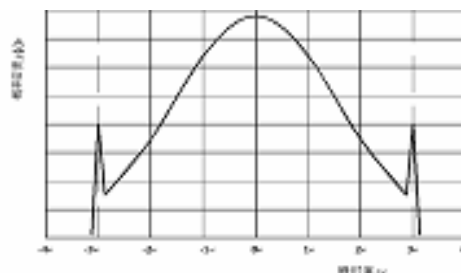


图 13-11b 削波后的瞬时加速度的分布

(3) 加速度谱密度容差

控制点上的加速度谱密度的容差，整个频率范围内应在 $\pm 3\text{dB}$ 内，该容差一般在低频段容易做到，在高频段由于样品在高频时易产生共振，而且有时还会有许多共振峰，所以不易达到。因此有的标准例如电子及电气元件试验方法国军标和美军标中的规定为：50~1000Hz $\pm 1.5\text{dB}$, 1000~2000Hz 为 $\pm 3\text{dB}$ 。另外对特别大而复杂的样品，或对高频段有许多共振峰的样品，经供需双方共同协商，可以适当放宽。下图 13-2 为加速度谱密度的容差图。

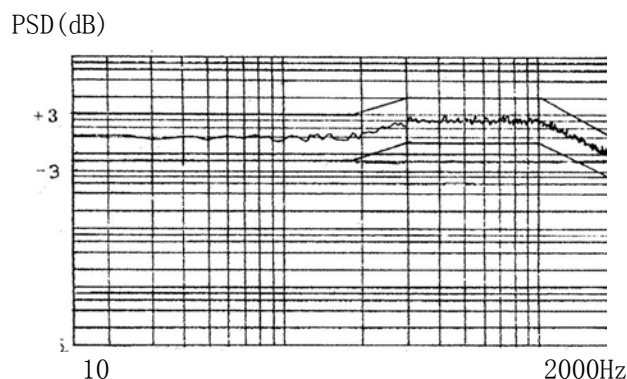


图 13-2 为加速度谱密度的容差图

(4) 总方均根加速度容差

上面已说，总方均根加速度是加速度谱密度曲线下的积分面积，由于加速度谱密度有 $\pm 3\text{dB}$ 的容差，为使其容差不发生在同一方向（例如正方向或负方向）上，即保证试验所需的总的振动能量，要求总方均根加速度容差在 $\pm 1\text{dB}$ 的范围内，并在控制点上测量。

(5) 横向运动

在垂直于主振轴向的任一轴上测得的检测点的加速度谱密度不应超过规定值的 100% (5dB)，并且相应加速度方均根值不应超过基本运动规定值的 50%。在特殊情况下，例如小样品，有关规范应限制横向运动的加速度谱密度以保证不超过基本运动 3dB。

13.6 试验程序

随机振动试验的试验程序通常由预处理、初始检测、初始响应检查、均衡、功能试验、耐久试验、最后响应检查、恢复、最后检测等各步组成。其中初始与最后响应检查、均衡、功能试验、耐久试验有别于其它力学环境试验。

13.6.1 初始与最后响应检查

初始与最后响应检查是为了试验样品的动态特性，样品和夹具的相互特性，以便试验样品能在随机振动试验设备动态范围内（或合适位置上）合理控制试验，对用模拟式控制的随机台（现几乎没有，但国标和 IEC 标准仍保留了该试验方法）进行试验时，试验前首先需要通过响应检查得出波峰幅值、波峰频率、波谷幅值、波谷频率、峰谷幅值比、峰谷频率比等参数。响应检查另一个目的是为了帮助分析和确定由随机振动试验引起的各种故障和疲劳破坏，其方法是通过记录和比较在初始与最后响应检查中所发现的机械共振和其它响应（如故障、性能超差等）现象的危险频率所发生的变化来进行。初始与最后响应检查一般采用正弦振动来进行，国标和 IEC 标准中对初始与最后响应检查的振动量级为：

表 13-1 初始与最后响应检查的振动量

序号	加速度谱密度 (g^2/Hz)	正弦振动幅值 (g)
1	< 0.05	1.0
2	0.05-0.2	1.5
3	>0.2	2.0

考虑到振动台的位移极限，在试验频率范围的低端可以降低加速度幅值。在初始与最后响应检查时，在整个频率范围内来回扫频，其扫频速率一般为 1oct/min，具体方法要与正弦振动试验中的初始与最后响应检查完全一样。

13.6.2 均衡

由于随机振动试验比较复杂，为了避免试验前的激励对试验样品产生附加的影响，所以在随机振动试验前需要预调（预试验），即均衡。均衡就是补偿试验样品（含夹具）的动态特性，也就是按规定的加速度谱密度的频谱分配振动能量。均衡通常先在较低的量级上进行，使谱密度修正到容差范围内，然后逐步向高能级上进行，直到达到所规定的并符合容差要求的谱密度。为了保证样品不产生过试验，均衡的时间通常是有限制的，国标和 IEC 的规定为：

小于规定等级的 25%，无时间限制；

在规定等级的 25%~50%，其均衡时间不超过规定试验时间的 1.5 倍；

在规定等级的 50%~100%，其均衡时间不超过规定试验时间的 10%；

通常的做法是，先从 -12dB 开始，然后 -9dB、-6dB、-3dB、到 0dB，一步一步平稳上升直到规定的试验量级 0dB。上述试验时间不能从规定的试验时间中扣除。

随机振动试验的成败及其再现性，在很大程度上取决于均衡与控制，与正弦振动试验一样，对小样品或各固定点处的机械阻抗没有显著差别的样品，通常都采用单点均衡与控制；多点均衡与控制主要用于大型和复杂的样品，大型和复杂的样品由于各固定点之间的距离大，而且需要复杂的装夹，同时由于样品和夹具的共振和反共振，使得传递特性有较大的动态范围，再加上振动台面的不均匀度等原因，用单点均衡与控制对整个被试系统很难有代表性。同时以单点控制施加给样品的加速度谱密度和总方均根加速度及其容差，很难保证其它点上也是这样，并都在容差范围内。当采用多点均衡与控制时，由于将各点上的信号进行统计平均，提取最大值或最小值，从而建立起一个具有代表性的虚拟控制点，所以对整个系统更具有代表性，它能确保试验所需的条件（严酷等级），也保证了试验的再现性。

无论是单点均衡与控制还是多均衡与控制，其控制点都必须选择好。单点均衡与控制，可从四个检测点中选择最有代表性的一个检测点作为控制点，其它三个点上的信号可以引出来作为检测验证用；对多点控制至少应将三个或三个以上的检测点上的信号加以统计平均，或取最大值或最小值（通常是使最小值与所规定的谱密度相一致）作为均衡与控制信号。

13.6.3 功能试验和耐久（强度）试验

功能试验是考核产品在振动状态下的工作能力，例如是否产生故障、失灵、性能下降等。功能试验可在产品的正常工作状态下进行，也可在最严酷的工作条件下进行，视试验目的的不同而不同。功能试验用的振动量级通常为所规定的全量级，但当样品存在明显非线性等情况时，也可在较低能级上进行。在功能试验期间，所测量和记录功能和性能指标应达到样品所要求的功能和性能指标容差。

耐久（强度）试验主要考核产品与其寿命相一致的结构强度和功能寿命，也就是保证在通常的使用和维修条件下所应达到的寿命。对非运载工具上使用的产品应称振动强度试验，因为对电子产品而言，主要是刚度问题，不是强度问题。特别对非运动状态下使用的产品，只要通过振动强度试验的考核就可以了，不会有疲劳问题，即耐久问题。即使在运载工具使用的产品，除对电子产品的结构重量要求非常苛刻（例如像要求运载工具本身那样要求），否则也不会有疲劳问题，因为电子产品的结构强度相对于运载工具都是很富有余的。在进行耐久（强度）试验时，试验样品可在工作状态下，或部分工作状态下，或在不工作状态下进行。做耐久（强度）试验时，应测量和记录样品的性能，但试验结束后的测量不能出现功能和性能下降现象。

功能试验和耐久（强度）试验与正弦振动试验一样，可以合在一起进行，也可分开来进行。无论是功能试验还是耐久（强度）试验，一般都在三个相互垂直的三个方向上进行，标准与规范上的要求往往是三个方向上振动量级相同，其实在许多情况下水平二个方向上振动量级都小于垂直方向，如果产品研制中需要降低水平二个方向上振动量级，则可产品技术规范与试验大纲中作出规定。如不作特别规定，三个方向的试验顺序并不重要，可以视试验的具体情况而定。

在功能试验和耐久（强度）试验期间，对一些特别重要的样品或防止对试验结果引起争论，则应抽取瞬时加速度的时间历程样本，以对加速度谱密度进行验证。对较长时间的试验应试验开始、中间、结束时都抽取样本。在试验过程中，若安装和紧固发生了变化，则一定要抽取追加样本，以观察加速度谱密度是否发生了变化没有。

13.7 随机推力与总方均根值的计算

13.7.1 随机推力的计算

在随机振动试验前，首先要选用一合适的振动台，因为随机振动的试验费高，而且推力愈大试验价格愈高，而且这种试验设备价格比不是线性关系，似乎是指数关系。所以首先要按被试产品重量、夹具重量、试验要求的总方均根加速度、振动台运动部件重量等计算出需多大推力的振动台。

13.7.2 总方均根加速度的计算

随机振动试验的总方均根加速度是加速度功率谱密度曲线下总面积的开方。计算公式如下：

$$G_{rms} = \left[\int_{f_1}^{f_2} g_{psd}(f) df \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13-9)$$

式中： G_{rms} - 总方均根加速度（g）

f_1 - 试验规范谱的下限频率

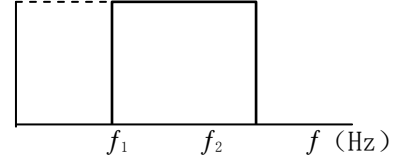
f_2 - 试验规范谱的上限频率

g_{psd} - 试验规范谱的幅值（g²/Hz）

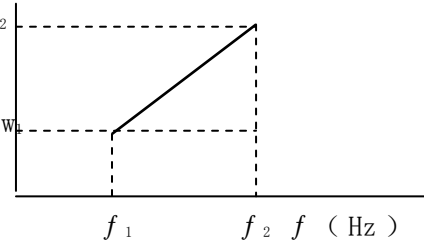
由于在加速度谱密度谱图上的上升谱和下降谱在对数座标上是直线，在线性座标上是

指数曲线，所以给出下列谱型总方均根加速度的计算公式为：

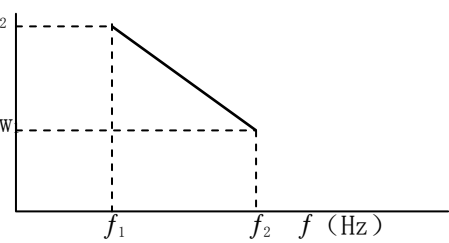
(1) 平直谱的总方均根加速度的计算

$$G_{rms} = \sqrt{w(f_2 - f_1)} \quad (13-10)$$


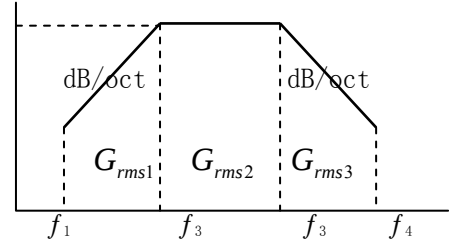
(2) 等斜率上升谱 (dB/倍频程)

$$G_{rms} = \sqrt{\frac{w_2 f_2}{m+1} \left[1 - \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^{m+1} \right]} \quad (13-11)$$


(3) 等斜率下降谱 (dB/倍频程)

$$G_{rms} = \sqrt{\frac{w_1 f_1}{m-1} \left[1 - \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^{m-1} \right]} \quad (13-12)$$


(4) 成形谱

$$G_{rms} = \sqrt{G_{rms1}^2 + G_{rms2}^2 + G_{rms3}^2} \quad (13-13)$$


(Hz)

上述(13-10)、(13-11)、(13-12)、(13-13)四式中： G_{rms} - 总方均根加速度； f_1 、 f_2 、

f_3 、 f_4 - 自下向上的各点频率； m - (dB/oct) / 3；上升谱： $w_1 = w_2 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^m$ 、下降谱： $w_2 =$

$w_1 \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^m$ 。

当然，当今的随机振动控制仪只要把随机振动试验的谱型输进去，就自动计算出总方均根加速度了，所以一般不用计算的。

13.8 振动试验中的重量衰减

第 14 章 正弦拍频振动

14.1 试验目的、影响机理、失效模式

产品在运输、储存、使用过程中会经受到地震、爆炸、颤振现象或机械振动等所引起的短持续时间的脉冲震荡力的作用,图 14-1 中的振动时间历程就是在歼击机上实测到的振动时间历程。那些在使用环境中安装在易受到随机或多频激励的结构上的产品,在这种短持续

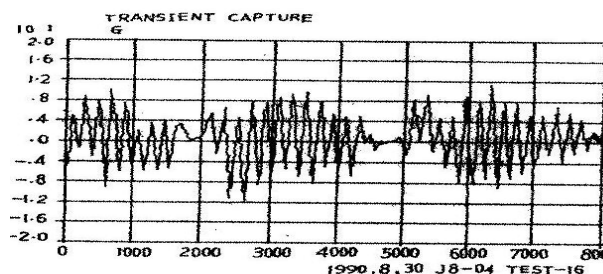


图 14-1 歼击机上实测到的振动时间历程

时间的脉冲振动的作用下,在其共振频率上会产生一种正弦拍频运动响应,然后作为输入传递到受此影响的产品上。这种振动对产品的影响比一般的平稳随机振动和正弦振动严酷,它能引起功能不正常、性能指标降低,甚至工作中断、严重时会导致破坏结构。

本正弦拍频振动试验方法提供了一种在试验室内再现那些与产品实际可能经受到的对产品相似的影响,但并不完全需要再现实际环境的试验方法,用这种方法比平稳随机振动和正弦振动更接近于实际环境的激励,而产生的响应比连续正弦波产生的响应更广阔。

本试验的目的是提供一个用正弦-拍频振动试验方法来确定样品抗御规定严酷等级瞬时振动能力的标准试验程序。按规定的性能确定样品的机械薄弱环节,或用来检验规定性能的下降情况,并根据试验结果判定样品是被接收还是拒收。

14.2 正弦拍频振动的描述

所谓正弦拍频是指用一较低的正弦波调制的某一频率的连续正弦波,一个正弦拍频的持续时间为调制频率的半个周期,如下图 14-2 所示。用正弦拍频振动试验方法进行试验时,样品在固定频率上用若干预定的正弦拍频振动激励。

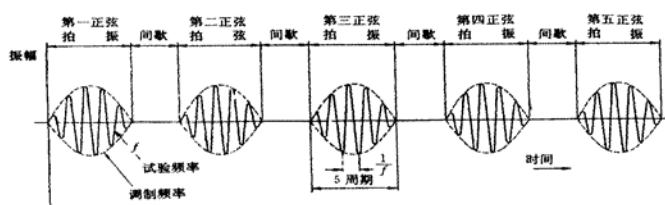


图 14-2 正弦拍频振动时间历程图

这些固定试验频率可以是预定频率，也可以是正弦振动试验响声检查辨别出来的危险频率。在每一独立的正弦拍频之间有一间歇，留给样品一个自由响应的衰减时间。

正弦拍频的一般数学表达方法；

$$a(t) = a_0 \cdot \sin 2\pi ft \cdot \sin \frac{2\pi ft}{\rho} \quad (14-1)$$

$$\text{式中: } 0 \leq t \leq \frac{\rho}{2f}$$

a_0 —试验量值

f —试验频率

ρ —试验频率和调制频率的比率

因为加速度、速度和位移是相互联系的，只要选择其中的一个作为基本函数就可以了，并且对其它有某些影响。当用加速度作基本信号，在每一拍振结束处将存在残余位移。

为了避免这种影响，可以速度作为基准信号，此时加速度、速度和位移的正弦拍频关系见下式 14-2、14-3、14-4、14-5。 加速度、速度和位移正弦拍频的波形见图 14-3。

加速度的正弦拍频：

$$a(t) = a_0 \cdot \frac{1}{2} \left[\left\{ -\left(1 - \frac{1}{m}\right) \cdot \sin 2\pi \left(1 - \frac{1}{m}\right) ft \right\} + \left\{ \left(1 + \frac{1}{m}\right) \cdot \sin 2\pi \left(1 + \frac{1}{m}\right) ft \right\} \right] \quad (14-2)$$

速度的正弦拍频：

$$v(t) = \frac{a_0}{2\pi f} \cdot \frac{1}{2} \left[\cos 2\pi \left(1 - \frac{1}{m}\right) ft - \cos 2\pi \left(1 + \frac{1}{m}\right) ft \right] \quad (14-3)$$

$$v(t) = \frac{a_0}{2\pi f} \sin 2\pi ft \cdot \sin \frac{2\pi ft}{m} \quad (14-4)$$

位移的正弦拍频：

$$d(t) = \frac{a_0}{(2\pi f)^2} \cdot \frac{1}{2} \left[\left\{ \frac{1}{1 - \frac{1}{m}} \right\} \sin 2\pi \left(1 - \frac{1}{m}\right) ft - \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1}{m}} \right\} \sin 2\pi \left(1 + \frac{1}{m}\right) ft \right] \quad (14-5)$$

$$\text{式中: } 0 \leq t \leq \frac{m}{2f};$$

m — 加速度正弦拍频的试验频率和调制频率的比例，该比值等于 $2n - 1$ ，其中 n 是加速度正弦拍振的循环（周期）数。

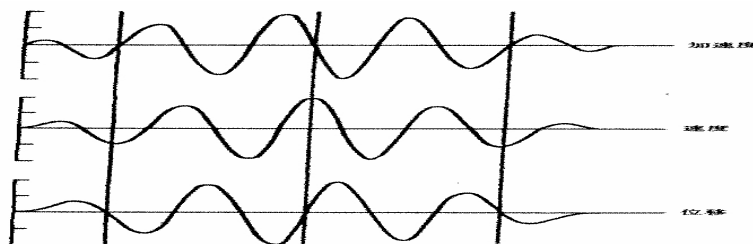


图 14-3 加速度、速度和位移正弦拍频的波形

14.3 正弦拍频振动试验条件

正弦拍频振试验只有 IEC 和国标有此试验方法,美军标和国军标没有这种试验方法。正弦拍频振动试验条件(试验严酷等级)由试验频率、试验量值、正弦拍频中的循环数、正弦拍频的个数等参数组合确定。同其它经典试验方法一样,如果有产品安装平台环境条件数据就用产品安装平台的数据,如果没有,或是可用多种场合的货架产品,可以根据下面给出的条件通过工程判断来确定时间历程振动试验的条件。

14.3.1 试验频率

试验频率是指激励样品的频率,正弦拍频振试验的频率是由预定频率(含共振频率)、或由振动响应检查得出的危险频率二种,或两种频率同时兼有。当在振动响应检查中未发现危险频率时,可在所规定的试验频率范围以不大于二分之一倍频程为一频率点的频率上进行试验。由上述可见,在未规定预定频率的情况下,要确定试验的频率,首先要确定振动响应检查的频率范围。例如地震时,地面振动的频率一般在 1~33Hz 的范围内,但本方法考虑的是地震通过建筑物至产品安装结构传递时,在其自然频率上产生的拍频振动对产品的影响,所以振动响应检查的频率范围,将视产品的具体情况不完全与之相同。国标和 IEC 标准中用于正弦拍频振试验试验频率可从下表 14-1 中选取一个下限频率 f_1 和选取一个上限频率 f_2 来构成试验频率范围,也可从下表 14-1 中选取一个推荐的振动响应检查的试验频率范围。

表 14-1

下限频率 f_1 (Hz)	上限频率 f_2 (Hz)	从 $f_1 \sim f_2$ (Hz)
0.1	10	0.1~10
1	20	1~35
5	35	1~100
10	55	5~35
	100	10~100

14.3.2 试验量值

试验量值是指试验波形中的最大峰值,即该值等于或小于调制半波的峰值。正弦拍频振动的幅值与诸如地震、爆炸等的强度和建筑物及产品安装结构的传递特性等因素有关。如果试验需在样品的二条轴线上进行,则应对每条轴线分别规定试验幅值。国标和 IEC 标准中的试验幅值是以位移幅值和加速度幅值二种形式给出。对 0.8Hz 的交越频率有 40mm/0.1g、80mm/0.2g、120mm/0.3g、200mm/0.5g;对 1.6Hz 的交越频率有 10mm/0.1g、20mm/0.2g、30mm/0.3g、50mm/0.5g、100mm/1g、200mm/2g;;对 8Hz 的交越频率有 0.4mm/0.1g、0.8mm/0.2g、1.2mm/0.3g、2mm/0.5g、4mm/1g、8mm/2g、12mm/3g、20mm/5g。如果上述的交越频率和位移/加速度不适合,可以另行给出,当然也可给出一个以上的

交越频率。

加速度、速度、位移的试验量值，可以按对恒定频率的正弦振动的相同方式十分精确的导出，即根据加速度正弦拍振的试验量值 a_0 ，导出速度峰 v_0 或位移峰值 d_0 ：

$$v_0 = \frac{a_0}{2\pi f} \quad (14-6)$$

$$d_0 = \frac{a_0}{4\pi^2 f^2} \quad (14-7)$$

14.3.3 正弦拍振试验的波形

正弦拍频试验的波形由图 14-2 所示的试验频率、调制频率和正弦拍振数组成。

(1) 正弦拍频振动中的周期（循环）数

正弦拍频振动中的周期（循环）数为：3、5、10、20，如下图 14-4 所示，

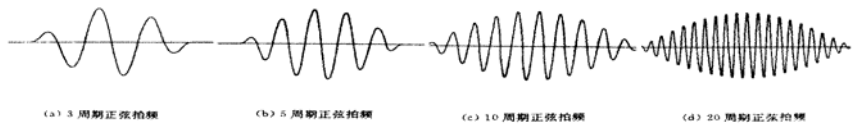


图 14-4 每个正弦拍频中的周期（循环）数

(2) 调制频率

调制频率是从试验频率和正弦拍频中的周期（循环）数中导出的（见本章 14.2 节 中的对正弦拍频振动的描述）。每一正弦拍频振动中的周期（循环）数与试验频率对调制频率的比值在加速度波形上有如下关系：

每一正弦拍频振动中的周期（循环）数	试验频率/调制频率
3	5
5	9
10	19
20	39

在 3、5、10、20 系列中，5 为优选值，这是一个经验数据，用这一数据，响应不会太高（见下图 14-5），又能考虑有一定危险频率的情况，因为这个值综合考虑了复盖不能确定危险频率的宽频带信号和需高响应值之间的关系。

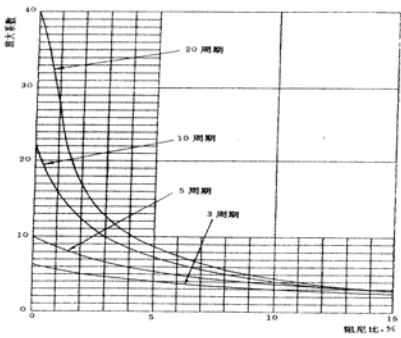


图 14-5 不同周期（循环）数的放大系数

(3) 正弦拍振数

正弦拍频振动试验时间是以正弦拍频数的多少给出的，产品的技术规范和试验大纲通常可以给出：1、2、5、10、20、50、..... 的正弦拍频数。

14.3.4 低周高应力疲劳效应

重现由振动（例如地震、爆炸、颤振等）高应力疲劳效应要求尽可能模拟这种环境，但这通常是困难的，因为当今的科学技术要将其精确的记录并在试验完全重现，其中包含

高量值交替激励的影响是困难的。为了解决这一问题，可根据产品可能经受到的高应力疲劳效应，其中包含对实测信号的模拟分析，增加安全系数，规定出所需大于规定应力值的高应力周期数。

14.4 对试验设备的要求

与正弦和随机振动试验一样，进行正弦拍频振动试验时，对试验设备的要求，是装上样品后的要求，不时指空台无负载是的要求，这种要求相对比正弦和随机振动要复杂一些，具体见表 14-2 所示有：

表 14-2

项目	要求和容差	
	振动响应检查	正弦拍频振动试验
基本运动	基本运动应为时间的正弦拍频振动函数。样品各固定点应基本同相，并沿平行直线运动	同左
失真度	基本运动的 25%	不适用
控制点幅值	基本运动的 15%	
检测点幅值	500Hz 以下 加速度的 $\pm 25\%$ 500Hz 以上 加速度的 $\pm 50\%$	
横向运动	不超过基本运动：50% 特殊情况(小样品)：25%	不超过基本运动：25%
试验频率	0.5 Hz 以下 ± 0.05 Hz 0.5 Hz~5 Hz $\pm 10\%$ 5 Hz~100 H ± 0.5 Hz 100Hz 以上 $\pm 0.5\%$	a 预定频率 0.5 Hz 以下； ± 0.05 Hz 0.5 Hz~5 Hz； $\pm 10\%$ 5 Hz~100 Hz； ± 0.5 Hz 100Hz 以上； $\pm 0.5\%$ b 响应检查时，试验频率与危险频率之间的频率偏差不得超过 $\pm 2\%$
旋转运动	若寄生旋转运动对试验有影响可规定要求，并记录在试验报告中	同左

14.5 试验程序

与其它振动试验一样，正弦拍频振动试验也带有一定程度的工程判断，因此在制定技术规范 and 试验大纲时，应根据样品的使用环境确定适合样品使用要求的严酷等级和试验程序。正弦拍频振动试验法的试验程序由预处理、初始检测、初始振动响应检查、时间历程试验、中间检测、最后振动响应检查、恢复、最后检测各步组成。下列各步有别于其它试验：

14.5.1 振动响应检查

为了研究样品在振动条件下的动态特性，应对试验频率范围进行响应检查。振动响应检查应该在试验频率范围内用正弦波进行，以及按有关规范规定的试验量值进行。振动响应检查通常是以不大于每分钟一个倍频程的速率进行对数扫频。但如果为更准确的确定响应特性。扫频速率可以放慢，但避免不适当的停顿。

振动响应检查时，应选择合适的激励峰值，使样品的响应保持在小于正弦拍频振动试验期间的峰值上，但也要在一个足够高的量值上，以便能检测出危险频率。

若需要,样品在响应检查期间应工作,若因样品工作而不能评价机械振动特性时,应在样品不工作的条件下进行附加振动响应检查,在这个阶段,为了确定危险频率,应对样品进行能确定危险频率的认真检查,并将样品检查的结果写在试验报告中。

在某些情况下,可以要求在正弦拍频条件试验结束后再进行一次附加的响应检查,以便比较正弦拍频振动试验前后的危险频率。如危险频率发生变化,需采取什么措施。最重要的是两种振动响应检查应采用同样的方法和在同样的量值下进行。

14.5.2 正弦拍频振动

当确定的试验严酷等级(指试验频率、试验量值、正弦拍频中的循环数、正弦拍频的个数)进行试验时,在连续的正弦拍频之间应有一个间歇,以便使样品的响应运动不出现有效的迭加。二个相邻正弦拍频之间的间歇时间可从下式中得出:

$$T > \frac{1}{f} \times \frac{100}{d} \quad (14-8)$$

式中: T - 试验时间(s)

f - 试验频率(Hz)

d - 试验频率的临界阻尼(%)

如果试验频率是通过振动响应检查而获得的,而且所得出的危险频率很多时,则会由于应力循环次数太多而导致疲劳损伤,应注意到这不是本试验的目的,因为本试验不是从疲劳角度考虑问题,因此在这种情况下应适当减少频率点或考虑采用其它方法。

对于尺寸和质量大的样品,或者重心远偏离几何中心的样品,应慎重进行试验,因为这类样品易引起横向运动和旋转运动。

如果每条轴线上规定有多个加速度等级时,则应从最低的加速度等级开始,一个等级一个等级地向上完成。

试验时,控制点的实际控制信号,包括所用任何滤波器的响应,都应当记录在试验报告中。

产品的技术规范和试验大纲应给出是单轴线试验,还是双轴线试验。

(1) 单轴线试验

正弦拍频振动试验一般优先选用单轴线试验,试验时应沿着每条优选轴线(通常指样品最脆弱的三条正交轴线)依次进行,一条轴一条轴线地进行,直至完成该条轴线的试验。若无特殊规定,这些轴线的先后试验的顺序并不重要的。

(2) 双轴线试验

双轴线试验是指沿着两条优选试验轴线同时施加正弦拍频振动。在每一试验频率上,试验顺序应当是先在 0° 然后在 180° 相对相位偏移之间进行。

14.5.3 中间测量

当产品经受到地震、爆炸、颤振等现象或机械振动等所引起的短持续时间的脉冲震荡力的作用时都是在工作状态下,正弦拍频振动试验也应在工作状态下进行,并且在试验中要进行参数检测,即中间测量。

第 15 章 时间历程振动

15.1 试验目、影响机理、失效模式

产品在运输、贮存和使用期间可能会经常受到短持续时间的随机形式的动态应力作用，如地震、爆炸以及在运载工具上使用或通过运输工具运输时产品中就会所产生这些应力，这些力的特性和样品的阻尼（描述系统中各种机理产生的能量损失，阻尼取决于许多参数，如系统结构、振动模态、材料等）往往会使样品的振动响应达不到稳态条件，属非平稳随机振动范畴。

这种力既不同于一般的平稳随机振动，又不同于简单的正弦振动。这种振动会导致产品的结构破坏，性能下降，工作不稳定，甚至工作中断。根据我国某单位 90 年代对机载（歼击机）、车载电子设备的安装平台振动环境条件的实测和数据处理过程统计，这种波形占全部所测时间历程数据的比例约为 8%到 10%。

研究这种时间历程产生的原因，对产品的影响机理，以及试验室的模拟技术。在试验室采用时间历程法来模拟这种振动形式，并分析其对电子产品的影响，借以提高电子产品抗御这种非稳态振动的能力，应作为我们今后开展环境试验设备和环境试验技术研究的任务之一。为了国际贸易的需要，参与国际市场竞争，特别是便于产品的进出口，我们也应重视该这种试验技术和标准的研究与应用。

本试验的目的是规定一个时间历程振动方法来确定样品经受（抗御）规定严酷等级瞬时振动的能力。并以此来确定样品的功能、性能及薄弱环节，并用这些信息结合产品的技术规范等来确定产品是否符合设计指标要求，是否被接收。

与其它方法相比，时间历程试验避免了过试验的倾向。这是因为该方法尽可能真实地重现或密切地代表了实际环境，对由于采用太保守的试验方法（这是当前在制定和确定经典试验方法的环境试验条件时普遍存在的）而由此而产生过应力或疲劳的可能性将大大减少。

15.2 时间历程的描述

典型时间历程（时间历程为：加速度、速度、或位移随时间变化的函数记录）振动的波形如下图 15-1 所示

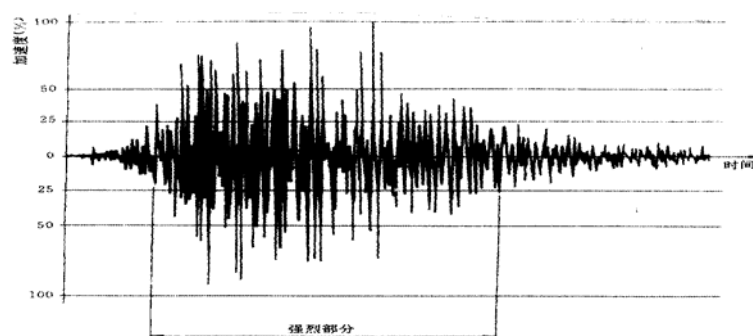


图 15-1 典型的时间历程

对运载工具进行过现场振动实测的科技人员都知道，在实测到的时间历程信号中，往往有一定比例的类似上述波形的时间历程信号。由于种种技术上的困难，当今的对现场振动实测信号的处理仅对平稳随机振动，对这类信号在对随机信号的平稳性检验中都是剔除的。

然而实际环境是存在的，例如歼击机在做各种特技（战斗）动作就会出现图 15-1 所示的振动时间历程。

15.3 时间历程振动试验条件

时间历程振动试验当今世界只有 IEC 和国标有此试验方法，美军标和国军标没有这种试验方法。时间历程振动试验的试验条件（严酷等级）由试验频率、所需响应谱、高应力响应周期数、时间历程数等参数综合确定。同其它经典试验方法一样，如果有产品安装平台环境条件数据就用产品安装平台的数据，如果没有，或是可用多种场合的货架产品，可以根据下面给出的条件通过工程判断来确定时间历程振动试验的条件。

15.3.1 试验频率

试验频率可从下表 15-1 中选取一个下限频率 f_1 和选取一个上限频率 f_2 来构成试验频率范围，也可从下表 15-1 中选取一个推荐的试验频率范围。

表 15-1

下限频率 f_1 (Hz)	上限频率 f_2 (Hz)	从 $f_1 \sim f_2$ (Hz)
0.1	10	0.1~10
1	20	1~35
5	35	1~100
10	55	5~35
55	100	10~100
100	150	10~500
	300	10~2000
	500	55~2000
	2000	

15.3.2 零周期加速度值 (g)

响应谱上加速度的高频渐近值，它代表时间历程中加速度的最大峰值，但它不是响应谱中的加速度峰值，该可峰值可从 1、2、5、20、..... 系列中选取。

15.3.3 要求响应谱

对时间历程试验，产品技术规范和试验大纲要给出试验要求的响应谱形状、值和容差（要求响应谱的容差带应在 0%~50% 的范围内，见图 15-2），包含零周期加速度值，典型

要求响应谱的对数曲线图如图 15-2 所示。若试验样品各轴线的要求不同时，还要分别给出各轴线的要求响应谱。

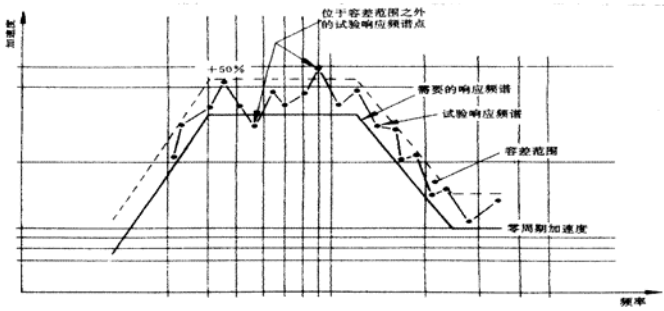


图 15-2 典型要求响应谱的对数曲线图

15.3.4 时间历程数

产品技术规范和试验大纲要规定对每一轴线和每一时间历程量值施加的个数，推荐的个数为：1、2、5、10、20、50……。如果施加的时间历程的量值在一个以上时，应从最低到最高。并且每一时间历程之间要有间歇。

15.3.5 时间历程的持续时间

产品技术规范和试验大纲要规定时间历程的持续时间，以秒为单位的推荐持续时间为：1、2、5、10、20、50……。

15.3.6 时间历程强烈部分的持续时间

从图 15-1 可见，所谓时间历程强烈部分是指时间历程曲线上达到 25%最大值到最后下降到 25%最大值这段时间历程的时间。产品技术规范和试验大纲要规定出这种强烈部分的时间占时间历程总持续时间的比例，推荐的比例为：25%、50%、75%。

15.3.7 高应力循环的次数

所谓高应力循环是指导致在试验样品中产生疲劳应力值的响应循环数，如图 15-3 所示。

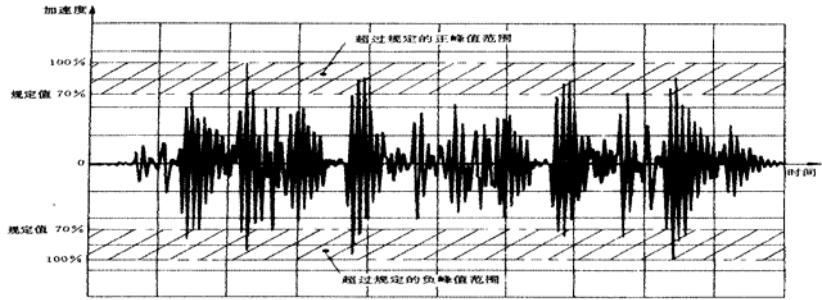


图 15-3 振荡器在特殊频率上的典型响应

高应力循环用位于时间历程强烈部分中的特殊危险频率所需的响应谱的 50%、70%（优选值）、90%来表示。应从下列系列中选取高应力循环此数：4、8、16、32……。

15.4 对试验设备的要求

与正弦、随机、正弦拍频振动试验一样，进行时间历程振动试验时，对试验设备的要求，是指装上样品后的要求，不时指空台无负载是的要求，时间历程振动试验对试验设备的要求可参见正弦拍频振动试验表 14-1 中的要求。下述为本试验的特殊要求：

除试验装置和试验产生的频率外，控制点上信号不应包括试验频率范围以外的任何频率。试验装置产生在试验频率范围外的信号最大值在无样品的情况下不应超过控制点规定信号最大值的 20%。在评价试验响应谱时不考虑试验频率范围以外的频率。

15.5 试验程序

与其它振动试验一样，时间历程振动试验法的试验程序由预处理、初始检测、初始振动响应检查、时间历程试验、中间检测、最后振动响应检查、恢复、最后检测各步组成。下列各步有别于其它试验：

15.5.1 振动响应检查

为研究样品在时间历程振动试验条件下的动态特性、确定危险频率、比较试验前后危险频率发生的变化、出现变化后所应采取的措施等。时间历程振动试验的振动响应检查与正弦振动、随机振动、拍频振动一样，不同的是激励峰值的选择应使样品产生的响应保持小于时间历程试验时样品的响应，但应保持在一个足够高的电平上，以便发现危险频率。另外，在某些情况下，振动响应检查还可用来检查和确定阻尼比。

15.5.2 试验

根据试验大纲中规定的试验条件要求对试验样品进行试验，在连续的二个时间历程之间应有一个间歇，以使样品的响应运动不发生明显的叠加。

是进行单轴线试验、双轴线试验、还是三轴线试验按试验大纲的规定：

(1) 单轴线试验

进行单轴线试验时，依次沿着试验样品每条优选试验轴线进行，若试验大纲没有特别规定，沿这些轴线试验的先后顺序是不重要的。

(2) 双轴线试验

双轴线试验是指沿着试验样品的二条优选轴线同时施加二个时间历程。如果二个时间历程不是独立的，则先以相对相位角 0° ，然后以 180° 重复每一试验。在进行双轴线试验时，可用能同时产生二轴线运动的双向振动台进行，也可用单方向振动台通过单斜线安装来进行。

(3) 三轴线试验

三轴线试验是指沿着试验样品的三条优选轴线同时施加三个时间历程，对这种试验最好用三轴向的振动试验系统进行，例如多轴多自由度试验系统。

15.5.3 中间检测

在时间历程数试验期间，样品是否应工作，并且是否应测量其性能由试验大纲规定。

15.6 时间历程的产生

时间历程振动试验的基本运动是如图 15-1 所示的时间历程，这种时间历程可以来自：

(1) 自然事件自然时间历程

自然事件自然时间历程是指现场（产品的使用平台）实测到的能代表产品使用情况的典型时间历程

(2) 随机样本（人工时间历程）

随机样本（人工时间历程）是指对产品若干来自现场、相似产品等方面的时间历程样本，或为产生要求响应谱，对频率范围和振幅进行改进的随机运动记录样本，通过人工合成方法合成出的能代表产品现场使用的时间历程。

(3) 合成信号（人工时间历程）

在没有任何现场与实际使用数据的情况下，通过工程判断，采用在所规定的频率范

围内用人工合成方法（如频率合成法）合成出的时间历程，即人工产生的时间历程，其响应谱要包络到所要求的响应谱。人工时间历程应该用如下合适的分辨率产生：

- 当样品的阻尼比小于或等于 2%时，用不超过 1/12 倍频程频带的分辨率产生；
 - 当样品的阻尼比在 2%~10%时，通常用不超过 1/6 倍频程频带的分辨率产生；
 - 当样品的阻尼比大于或等于 10%，用不超过 1/3 倍频程频带的分辨率产生。
- 产品技术规范还可规定其它阻尼比值，或用其它方法得出，通常选用 5%。

15.7 要求响应谱的制订

在时间历程中，为了能更好的重现实际或现场环境，需要给出在进行时间历程时，样品应达到的响应，即要求响应谱（用户规定的响应谱），并作为试验条件要求的一部分，代表了必须满足的试验考核指标。因为在试验室进行试验时，样品本身将产生一个试验响应谱，这个试验响应谱在试验期间是通过监测振动台的运动产生，然后把试验响应谱和要求响应谱进行比较，以便确定试验指标是否已被满足。为了达到试验指标，试验响应谱必须包络要求响应谱。在测定试验响应谱时，往往先把样品换成等效质量进行尝试性试验或预运行，这样试验室可以调整试验值，而样品比不受不必要的疲劳和过试验。

要求响应谱可根据产品的使用环境和用途等确定，此处的响应谱是指“一系列单自由度物体按规定的阻尼比（在一个粘性阻尼系统中，实际阻尼与临界阻尼之比）经受到规定运动后的最大响应曲线，因此物体经受到的规定运动和阻尼比知道后，就可知道其响应谱”。

要求响应谱的容差是通过产品技术规范 and 试验大纲中规定的。在与试验响应谱比较时，若少部分的单个点落在容差带之外，试验仍可接受。在某些情况下，当试验尺寸大或质量大的样品时，在某些频率上达到要求的容差是不可能，在这种情况下，或者是技术规范和试验大纲允许一个更宽的容差，或者采用一个替代的试验方法。

在没有产品实际使用环境条件的实测数据时，或当不知道产品（如货架产品）的使用环境时，通常通过工程判断给一个阻尼系数来代表样品阻尼，然而按下列各步得出通用型的要求响应谱（如图 15-4）：

- a 从表 15-1 中选取产品在实际环境中可能遇到的这类时间历程振动的频率范围；
- b 零周期加速度值，
- c 在 f_1 和 $2f_1$ 之间用 12dB/倍频程的斜率的上升谱规定加速度；
- d 在 $2f_1$ 和 $1/3f_2$ 之间最大加速度等于：
 - 对 10%的阻尼比，为零周期加速度值的 2.24 倍；
 - 对 5%的阻尼比，为零周期加速度值的 3 倍；
 - 对 2%的阻尼比，为零周期加速度值的 5 倍；

在具体确定要求响应谱时：

当样品典型阻尼比在 2%~10%时，推荐用阻尼比为 5%时的要求响应谱；

当样品典型阻尼比 $\leq$ 2%时，仅推荐用阻尼比为 2%时的要求响应谱；

当样品典型阻尼比 $\geq$ 10%时，推荐用阻尼比为 10%时的要求响应谱；

当频率 f_1 低于 0.8Hz 时， $2f_1=1.6$ Hz 以下的加速度由 12dB/倍频程的斜率来确定。

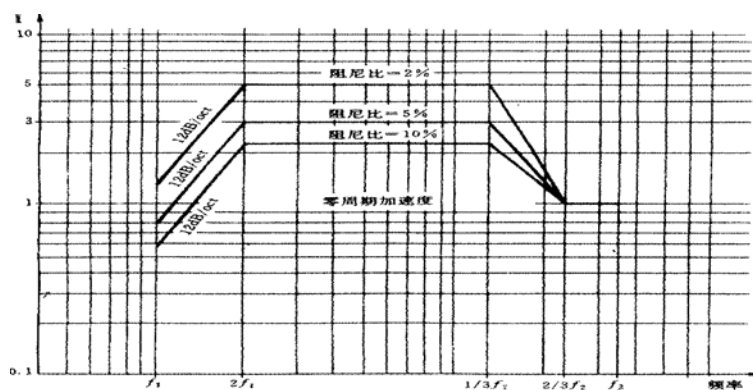


图 15-4 通用（典型）型 RRS（推荐响应谱）形状

15.8 试验响应谱的检查

试验响应谱应和产生要求响应谱同样的方法显示和进行检查，即：

- 如果样品的阻尼比小于或等于 2%时，按 1/12 倍频程频带检查；
- 如果样品的阻尼比在 2%~10%时，按 1/6 倍频程频带检查
- 如果样品的阻尼比等于或大于 10%，按 1/3 倍频程频带检查。

在某些情况下，由于要求响应谱是人工成形和加宽，以致使试验响应谱无法在容差带内产生，此时要求响应谱的容差可以修改。

15.9 高应力循环次数

重现由图 15-1 所示振动产生的影响，要求以一定的安全系数尽可能准确读模拟这种特定的环境。当不能充分知道环境时或难以模拟时，考虑安全系数时必须包括最坏的情况，其方法：。

(1) 保证试验响应谱包络所要求的响应谱，这种包络说明已经达到每个振动器响应的最大要求电平。

(2) 保证时间历程强烈部分的持续时间等于或大于要考虑的现象所产生的时间。

然而，上述这两种方法由于没有完全考虑高量值交变激励的影响，所以还是不够的。因为这种激励在危险频率上出现时，会产生对样品损坏的非弹性变形，这是有害的和危险的。此时考虑超过要求响应谱最大值的 50%的峰值就足够了。

第 16 章 地震试验

16.1 试验目的、影响机理、失效模式

全世界每年发生的可记录到的地震有 500 万次，其中能感觉到的有 5 万次，造成破坏的有千次，7 级以上造成惨重损失的破性地震每年要发生 10 余次，8 级以上造成毁灭性破坏每年平均要发生 1.1 次。就受震面积而言，最强烈的地震有感面积为 50 万平方公里，半径为 400 公里。毁灭性地震的有感面积为 200 万平方公里，半径为 700 公里。

地震是一种自然灾害，强烈的地震能在很短的时间造成极大的破坏。1976 年我国唐山地震中，所有供电、有线通信设备全部被破坏。地震对电子产品的典型震害有：电力变压器本体脱轨，移位，倾倒，从而造成漏油，拉断母线，甚至烧毁，其次是套管断裂，发兰错位等。高压断路器中受害严重的是空气短路器，少油断路器，其典型震害是支持瓷套从根部折断、高压隔离开关的支柱绝缘子折断、棒色绝缘子连同它的母线一起从支架上摔至地面。具有绝缘拉杠的 G 型玻璃钢型电池，凡放在基础台面上的都倾倒，摔坏，但烈度较底的地区只发生电池移位和电解益出等震害。1986 年苏联切尔若贝利核电站事故所造成的影响和核污染是震惊世界的。所以电子电工产品，特别是核电站用的电子电工产品，必须经过地震试验的考核，否则，它若因经受不住地震的影响，而导致在地震时供电中断，通讯设备无法将抢救信号传出，其后果更加严重。

地震是一种在三个方向上连续出现的随机运动。地震时，地面上的所有东西都将产生短持续时间的周期震荡。这种震荡最长一般能持续 30 秒左右，但 1985 年墨西哥市的大地震，其持续时间竟长达 3 分钟，其中剧烈震动的时间超过 60 秒。通常是震荡后就是一个平息过程，然后还会发生多次。就拿我国唐山 1976 年发生的 7.8 级地震来说，在地震后的

48 小时内, 5 级以上的余震 16 次, 3 级以上的余震 900 次。地震的强度取决于震级的大小和离震源的中心距离。就同一点上而言, 经多次测量表明, 水平方向的数值比垂直方向大, 通常是垂直方向的强度为水平方向的三分之一。最强烈的地震, 其频率范围通常为 1-33Hz, 在离震源中心的一定的距离上, 各种建筑物尚未达到灾难性破坏, 电子电工产品仍应工作情况下的加速度值大约为 0.5g (震源中心通常会达到 1g)。当做试验时, 通常要加 0.5 的安全系数, 即用 0.75g, 最大不超过 0.8g 来进行。

由地震产生的这种短持续时间的震荡, 除地震能产生外, 爆炸也会产生, 甚至某些机械震动也会产生。它们和地震一样, 也会使产品的安装松动, 结构变形, 断裂, 还会使产品工作失调, 失灵, 中断, 甚至丧失工作能力等。

由此可见, 地震试验的主要是模拟电子电工产品在使用期间可能受到由于地震、爆炸、某些机械震动或某些运输情况所产生的短持续时间的振荡力的影响。

16.2 二种地震试验方法

由于地震所产生的短持续时间的振荡是一种复杂的随机波, 所以目前在试验室内模拟地震和它对产品, 特别是电子电工产品的影响通常有两种方法, 即本书第 14 章介绍的正弦拍频振动法和第 15 章介绍的时间历程和法 (此处不再重复介绍)。当然这二种方法除用于产品经受地震影响的考核外, 还可以用于各种运载工具及人类活动产生的类似于正弦拍频振动和时间历程振动这类非平稳随机振动对产品影响的考核。

第 18 章 冲击试验

18.1 试验目的、影响机理、失效模式

产品在使用和运输过程中所经受到的冲击主要是由于车辆的紧急制动和撞击、飞机的空投和坠撞 (紧急迫降)、炮火的发射、化学能和核能的爆炸、导弹和高性能武器的点火分离和再入等所产生的冲击。冲击就是在一个相对较短的时间内将一高量级的输入脉冲力施加到产品上。冲击是一处很复杂的物理过程, 与随机振动一样, 它具有连续的频谱, 但又是一个瞬变过程, 不具备稳态随机的条件。产品受冲击后, 其机械系统的运动状态要发生突变并将产生瞬态冲击响应。产品对机械冲击环境的响应具有以下特征: 高频振荡、短持续时间、明显的初始上升时间和高量级的正负峰值。机械冲击的峰值响应一般可用一个随时间递减的指数函数包络。对于具有复杂多模态特性的产品, 其冲击响应包括以下两种频率响应分量: 施加在产品上的外部激励环境的强迫频率响应分量和在激励施加期间或之后产品的固有频率响应分量。从物理概念上讲, 产品受冲击 (即瞬态激励) 后所产生的冲击响应的大小代表了产品实际所受到的冲击强度。若产品的瞬时响应幅值超过产品本身的结构强度, 则将导致产品破损。可见产品受冲击所产生的损坏, 不同于累积损伤效应所造成的破坏, 而属于相对于产品结构强度来说是极限应力的峰值破坏。

这种峰值破坏会造成结构变形, 安装松动, 产生裂纹甚至断裂, 还会使电气连接松动, 接解不良, 造成时断时通, 使产品工作不稳定。这种峰值破坏还能使产品内部各单元的相

对位置发生变化，造成性能下降或超差，甚至会冲断元器件或部件，使其无法工作。归结起来：

- a) 零件之间摩擦力的增加或减少，或相互干扰而引起的产品失效；
- b) 产品绝缘强度变化、绝缘电阻抗下降、磁场和静电场强的变化；
- c) 产品电路板故障、损坏和电连接器失效；（有时，产品在冲击作用下，可能使电路板上多余物迁移而导致短路）；
- d) 当产品结构或非结构件过应力时，产品产生永久性的机械变形；
- e) 当超过极限强度时，产品的机械零件损坏；的确
- f) 材料的加速疲劳（低周疲劳）；
- g) 产品潜在的压电效应；
- h) 由于晶体、陶瓷、环氧树脂或玻璃封装破裂造成的产品失效。

从从上面的叙述可见，冲击会对整个产品的结构和功能完好性产生有害影响。这种有害影响程度一般随冲击的量级和持续时间的增减而改变。当冲击持续时间与产品固有频率的倒数一致或者输入冲击环境波形的主要频率分量与产品的固有频率一致时，会进一步增加对产品结构和功能完好性的不利影响。

所以，要保证产品具有好的抗冲击强度，并在上述冲击环境下或受上述冲击后可靠稳定的工作，冲击试验是解决这一问题的重要方法与手段。

采用本方法评估产品在其寿命期经受机械冲击下的结构和功能特性。这种机械一般限制在：频率范围不超过10,000 Hz，持续时间不长于1.0 sec。在大多数情况下，产品的主要响应频率不超过2000 Hz，响应的持续时间小于0.1sec。

18.2 现场发生的冲击及描述

要在试验室内完全重视产品在实际使用和运输环境中所经受到的本章 18.1 中描述的现场冲击是很困难的，因为这些冲击的量值变化很大，脉冲持续时间的变化范围很宽，并且又十分复杂。图 18-1a 是现场实测到的不连续冲击脉冲波形，从图中的冲击脉冲波形可见，它是难以用数学模型描述。

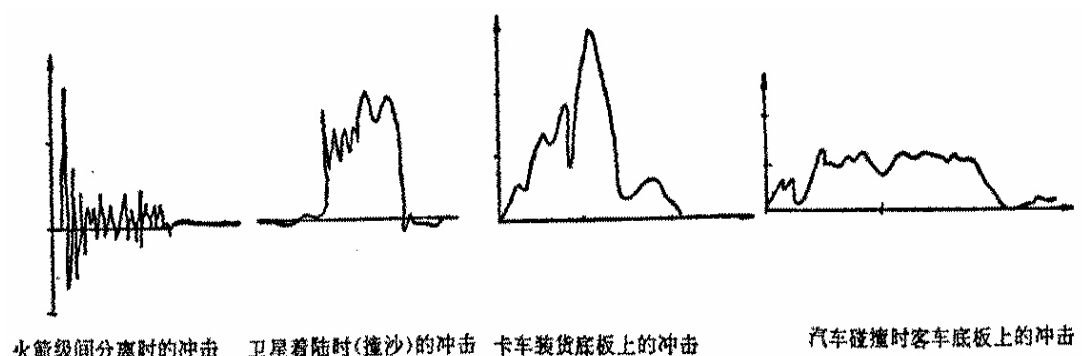


图 18-1a 现场冲击脉冲波形

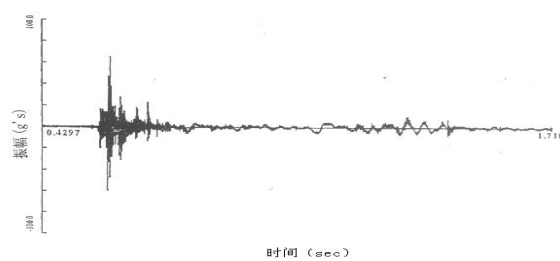


图 18-1b 实测到的加速度冲击响应时间历程,

图 18-1b 为一现场实测到的中等延续冲击加速度响应时间历程, 为评估这冲击响应时间历程对产品的影响, 可用:

- a) 有效瞬态持续时间 (T_e);
- b) 冲击响应谱 (SRS);
- c) 能量谱密度 (ESD);
- d) 傅立叶谱 (FS) 四种描述方法进估计。

18. 2. 1 有效瞬态持续时间 (T_e);

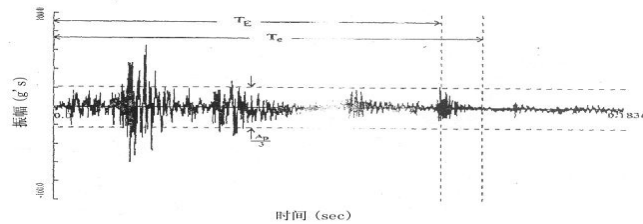


图 18-2 有效瞬态持续时间

T_E : 包含与冲击事件有关的超过峰值 A_p 1/3绝对值的所有时间历程振幅的最小时间长度。

T_e : 包含至少90%均方根 (RMS) 时间历程振幅的最小时间长度, 而这个振幅是超过与冲击事件有关的峰值RMS大小10%的量级 (T_e 对将要进行的复杂瞬态测量更有用)。

18. 2. 2 冲击响应谱 (SRS)

冲击响应谱 (SRS) 描述一个有阻尼单自由度系统的质块在无阻尼固有频率 f_0 处对持续时间 T_e 的冲击时间历程的最大响应。阻尼用“Q” (品质因子) 来表示 $Q=50$ 表示1%的临界阻尼, $Q=10$ 表示5%的临界阻尼, $Q=5$ 表示10%的SDOF临界阻尼。

对于冲击响应数据的处理, 把最大绝对加速度SRS作为初始值。计算SRS值的频率范围应从一个感兴趣的最低频一直到该谱的平直部分的频率。较高频率用于确保谱中没有任何高频内容被忽略。最低频率 f_{min} 由受试产品的频响特征来确定。对于 f_{min} 从冲击的第一个幅值上升开始, SRS要在时间间隔 T_e 或 $1/2 f_{min}$ 上计算 (取决于哪个更大)。

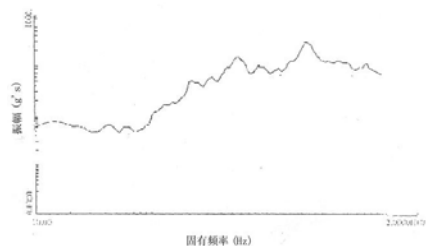


图18-3 冲击响应谱

18. 2. 3 能量谱密度 (ESD)

能量谱密度 (ESD) 用来比较多次冲击中频带内的能量分布。图516. 5-6表示对图516. 5-2所示冲击时间历程的ESD估计。

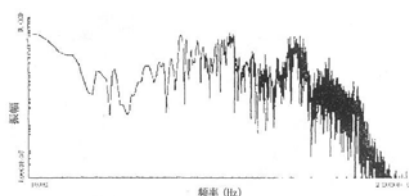


图 18-4 加速度冲击响应的 ESD 估计样本

18.2.4 傅立叶谱 (FS)

傅立叶谱 (FS) 用来记录多次冲击中整个频带内的频率分量。图 516.5-7 表示对图 516.5-2 所示冲击时间历程的 FS 估计。

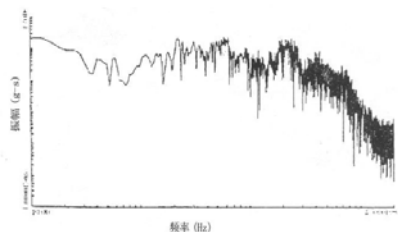


图 18-5 加速度冲击响应的 FS 估计样本

18.3 冲击的试验室模拟

目前试验室模拟产品现场所遇到的冲击有四种方法：

- a) 一种是规定标称（经典）冲击脉冲波形的方法；
- b) 另一种是规定冲击响应谱的方法；
- c) 再一种是规定一种冲击机的方法；
- d) 综合现场实测数据，在振动台波形控制下通过直接复现场实测数据的产生冲击。

18.3.1 采用现场实测数据

在有现场实测数据时，应尽量采用现场实测数据，即在振动台波形控制下通过直接复现场实测数据的产生冲击。

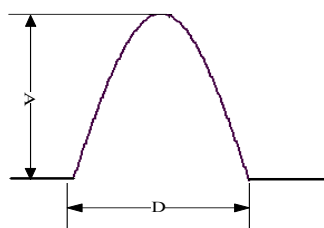
18.3.2 规定标称（经典）冲击脉冲波形

18.3.2.1 三种标称（经典）冲击脉冲波形

规定标称（经典）冲击脉冲波形的冲击试验方法：其目的大都用于：评估产品的结构和功能承受装卸、运输和使用环境中不常发生的非重复冲击的能力；确定产品的易损性，用于包装设计，以保护产品结构和功能的完好性；另外对安装在可能发生碰撞的平台上使用的产品，该方法还可用该试验测试固定该产品所用装置的强度。规定一种冲击脉冲波形的冲击试验主要是用来确定元器件、设备和其它产品在使用和运输过程中经受非多次重复的机械冲击的适应性，以及评价产品结构的完好性，其次还可用于微电子器件内强度试验。就产结构完好性而言，冲击试验还可作为产品满意设计和质量控制的手段。

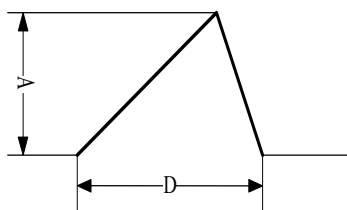
从图 18-1 可见，这些现场环境下的冲击脉冲波形要在试验室内直接用于试验是非常困难的。为了解决这个问题，采用的是等效损伤原理，即保证在试验室内用标称（经典）脉冲对产品进行冲击所产生的故障、损坏、失效与现场所发生的故障、损坏、失效相一致。所以本冲击试验方法又称为规定冲击脉冲波形的冲击试验法。这种方法是在没有现场实测数据时采用的方法。

用于本试验的标称（经典）冲击脉冲波形有三种，即半正弦波、后峰锯齿波、梯形波。半正弦波为正弦波的一半，如图 18-6a 所示；后峰锯齿波为具有短的下陷时间的不对称三角形，如图 18-6b 所示；梯形脉冲波为具有短的上升和下降时间的对称不规则四边形，如图 18-5c 所示。



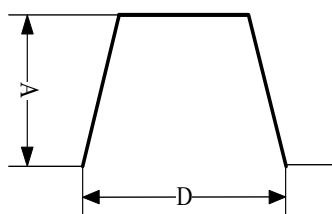
$$a(t) = \begin{cases} A \sin \frac{\pi}{D} t & 0 \leq t \leq D \\ 0 & t < 0, t > D \end{cases} \quad (18-1)$$

(a) 半正弦波



$$a(t) = \begin{cases} A \left(\frac{t}{D} \right) & 0 \leq t \leq D \\ 0 & t < 0, t > D \end{cases} \quad (18-2)$$

(b) 后峰锯齿波



$$a(t) = \begin{cases} A \left(\frac{t}{0.1D} \right) & 0 \leq t \leq 0.1D \\ A & 0.1D \leq t \leq 0.9D \\ A \left(1 - \frac{t-0.9D}{0.1D} \right) & 0.9D \leq t \leq D \\ 0 & t < 0, t > D \end{cases} \quad (18-3)$$

(c) 梯形波

图 18-6 三种标准冲击脉冲波形

18.3.2.2 试验条件及其选择

冲规定标称（经典）冲击脉冲波形的冲击试验方法的试验条件（严酷等级）由峰值加速度、冲击脉冲持续时间和冲击次数三个参数共同确定。

(1) 试验条件(严酷等级)参数

a) 峰值加速度 (A)

峰值加速度的大小能直观的反映出施加给产品的冲击力的大小。由于产品的结构大都是线性系统，即使是非线性系统，在应变不大的情况下，也可以看作是线性系统。所以，产品受冲击后所产生的响应加速度与激励加速度是成比例的。可见在一般情况下峰值加速度愈大，对产品的破坏作用愈大。

b) 脉冲持续时间 (D)

冲击脉冲的持续时间是指加速度保持在规定峰值加速度比率上的时间间隔。冲击脉冲持续时间对产品的影响很复杂，它对冲击效果的影响与被试系统的固有周期 (T) 有关。

对半正弦波，当 $D/T < 0.3$ 时；对梯形波， $D/T < 0.2$ 时；对后峰锯齿波， $D/T < 0.5$ 时。在产品上所造成的响应加速度都将随着 D/T 比率的增加而增加，但最大不超过激励脉冲本身的峰值加速度。

对半正弦波，当 $0.3D \leq D/T < 3$ 时；对梯形波，当 $0.2 \leq D/T < 10$ 时；对后峰锯齿波，当 $0.5D/T < 1.2$ 时，在产品上所造成的响应加速度都将超过激励脉冲的峰值加速度。而且，对半正弦波在 $D/T = 0.8$ 附近；对梯形波在 $D/T = 0.55$ 附近；对后峰锯齿波在 $D/T = 0.65$ 附近，都将出现最大响应加速度，其值分别为激励脉冲峰值加速度的 1.78 倍（半正弦波）、2 倍（梯形波）、1.3 倍（后峰锯齿波）。

对半正弦波，当 $D/T > 3$ 时；对梯形波，当 $D/T > 10$ 时；对后峰锯齿波，当 $D/T > 1.2$ 时，

在产品上所造成的响应加速度与激励脉冲的峰值加速度相同。

从上面的叙述可见，对同一种脉冲，由于其持续时间不同，对相同的产品所造成的影响也不相同。

c) 冲击次数

由于冲击主要考虑的是对产品极限强度的影响，而不是考虑累积损伤，所以用不着对产品进行多次重复试验，但为了避免偶然性，也需要一定的冲击次数。一般规定在每方向上连续冲击 3 次。又由于冲击所造成的最大响应可能发生在激励脉冲相同的方向上，也可能发生在与激励脉冲的相反方向上，因此，通常规定要在被试样品的三条互相垂直轴线的每个方向上进行，即六个方向上进行，所以冲击实验的次数规定为 $3 \times 6 = 18$ 次。

(2) 试验条件（严酷等级）介绍

规定脉冲波形的冲击试验方法已几乎被所有国内外的环境试验规范与标准所采用。例如国标 GB/T2423(元器件、整机)、IEC 标准 60068-2-27（元器件、整机）、英国国防部标准 07-55、(元器件、整机) 美国军标 810 F（整机）和 202F（元器件）、日本工业标准 JIS 等标准中都采用了此种方法。下表 18-1 中给出了国内外主要标准中规定的试验条件（严酷等级）要求。

表 18-1 国内外主要标准中规定的试验条件（严酷等级）要求

国标 GB/T2423 IEC 60068-2-27 英国国防部 07-55			国军标 GJB150 MIL-STD-810C/D/E			MIL-STD-810F			国军标 GJB360A MIL-STD-202F		
g	ms	波形	g	ms	波形	g	ms/s	波形	g	ms	波形
15	11	半 正 弦 、 后 峰 、 梯 形	1 飞行器设备-功能								半 正 弦 、 后 峰
30	6/11/ 18/40		15	11	半正弦				30	11	
50	11		20	11	后峰	20	11	后峰	50	11	
50	3		飞行器设备-坠撞安全						75	6	
100	11		30	11	半正弦	40	11	后峰锯齿	100	6	
100	6		40	11	后峰	30-50	$2\sqrt{2gh} / Am$	梯形(包装 易碎性)			
200	6		2 地面设备-功能								
200	3		30	11	半正弦	40	11	后峰			
500	1		40	11	后峰				500	1	半 正 弦
1000	1		地面设备-坠撞安全						1000	0.5	
1500	0.5	半 正 弦	60	11	半正弦	75	11	后峰	1500	0.5	
3000	0.2		75	11	后峰	30-50	$2\sqrt{2gh} / Am$	梯形(包装 易碎性)			

从表 18-1 可见，国标与 IEC 标准以及英国标准是一致的，而且等级很多，因为这三份标准是用于元器件到整机的基础性标准。它们给出的等级从元器件一直到整机，英国标准中的 30g、40ms 的等级，主要用于对舰船设备的基本强度考核。从表 18-1 还可见基础标准与专业标准不一样，美国军标 810C/D/E/F 和国军标 GJB150 主要是空用和陆用整机标准，所以给出的等级仅涉及到整机。

(3) 试验条件（严酷等级）的选择

如何正确地选择试验条件（严酷等级）往往是件不太容易的事。最好的方法是以实际环境的数据为依据。所以在正式确定试验条件（严酷等级）前，应请用户提供使用环境资料，或对产品的使用环境进行实测。然后直接利用所得数据进行试验，或以实测出的数据

作参考选择标准中的相应等级进行试验。然而对冲击进行现场实测通常很困难，另一方面测出的数据的处理也很困难。所以通常是根据产品安装的平台环境，通过工程判断，选用标准和规范中的相应的量级作为产品的设计输入和试验求。在具体选取时：

若运输环境比使用环境严酷，则应该用运输环境的数据。如果产品仅承受运输环境而不在运输环境下工作，则可先按运输环境的数据进行结构完整性试验，然后再按使用环境的要求进行功能试验。

在某些情况下，例如对一次有效的产品，可使所选择的试验条件高于实际要求。一般来说：100g 以下的等级主要用于运输和操作中所经受到的冲击；对剧烈的搬运、导弹的级间点火、爆炸所引起的冲击，通常采用 100g 或 200g 的等级；对直接与枪炮或爆炸装置连接的产品，通常用 1000g 或 1500g 的等级；对集成电路或微电子器件的结构完好性试验，通常用 1500g 或 3000g 的等级。

对元器件，由于不知道它们将被安装在何种设备中，有时即使知道所要安装的设备，还会由于设备内各单元对冲击的响应不同而要求不一样，所以元器件试验条件（严酷等级）的选择既要考虑所安装的设备，又要考虑它在设备中所受到的响应，可见它的选择比设备更困难。从表 18-1 可见，基础标准所以给出一系列的等级就是为了解决这一问题，即元器件厂将所生产的元器件按规范和标准中给出的冲击量值等级对元器件进行分类，以供不同的需要进行选择。

就通用整机的标准和规范中的量级而言，通常是比较保守（即安全系数高），所以在具体选取时要多研究与其相关的被试产品更接近的标准与规范。例如从表 18-1 可见，美国军标 810 F 和国军标 GJB150 中对飞行器上安装的设备的冲击试验要求为：功能试验 15g、11ms 和坠撞安全试验 30g、11ms 的是不分歼击机与运输机（民航机）的，这显然是不合理的，这二种飞机无论从要完成的功能还是所需的结构强度都是不一样的。所以对安装在运输机、民航机上的设备的冲击要求要从这类飞机的要求中选取（例如：RTCA DO 160C-1984 美国航空无线电技术委员会标准 机载设备环境条件和试验方法、HB6167. 5-1989 民用飞机机载设备环境条件和试验方法、CCAR-25 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准）。因为这类飞机上安装的设备的要求为：功能试验 6g 和坠撞安全试验 15g。

18. 3. 3 规定冲击响应谱

规定冲击响应谱的冲击试验方法：大都用于：评估炮火的发射（由火工装置动作导致产品经受的冲击效应）、化学能和核能的爆炸（例如高压波冲击）、导弹和高性能武器的点火分离和再入等所产生的冲击。规定一种冲击脉冲波形的冲击试验，如需要，也可用相应的冲击响应谱的来完成。

18. 3. 3. 1 冲击响应谱基本概念

众所周知，冲击激励脉冲是用加速度、速度和位移对时间的历程来描述的。研究这种激励脉冲本身的特性可以用付里叶谱来进行。但研究冲击的目的不是为了研究脉冲的本身，而是为了研究冲击脉冲对产品的破坏作用。冲击对产品的影响与产品本身的特性有关，这种特性反映在产品受冲击后所产生的响应上面。图 18-7 为一典型的电子产品。

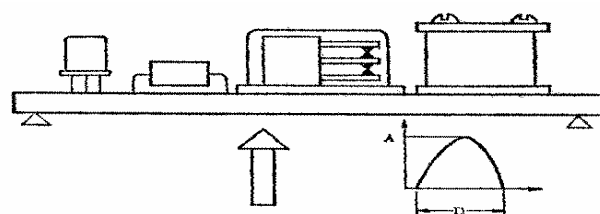


图 18-7 电子产品结构示意图

当它们受到一冲击脉冲（例如半正弦脉冲）的激励时，其响应过程便是一个不同加速度时间历程的振荡。由于任何机械系统都可以用刚性质量块、无质量弹簧、阻尼器三者组成的模型来表示，不同的机械系统不过是这三者的不同组合，复杂的机械系统也只是这三者的复杂串连和并连。所以，为了方便起见，可将图 18-7 中所示的每一个元器件都等效为图 18-8 的一个单自由度系统力学模型来研究，并以此作为复杂产品受到冲击影响的分析基础。

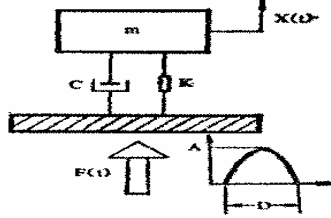


图 18-8 单自由度系统模型

当一个单自由度线性质量弹簧系统受到一冲击脉冲 $F(t)$ 的激励时，质量 m 的响应运动 $x(t)$ 可用下列微分方程来描述：

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (18-4)$$

式中： m - 系统质量

c - 系统阻尼

k - 系统冲击弹簧系统

$F(t)$ - 冲击激励函数

当冲击脉冲为标称半正弦冲击脉冲时，即：

$$F(t) = \begin{cases} A \sin \frac{\pi}{D} t & 0 \leq t \leq D \\ 0 & t < 0, t > D \end{cases} \quad (18-5)$$

对 18-4 式的微分方程求解，可得：

$$x(t) = \frac{\frac{A\omega}{\omega_n} \cdot e^{-2\xi t}}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2) + 4\xi^2 \omega^2}} \sin \omega_d t + \frac{A}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2) + 4\xi^2 \omega^2}} \sin \omega_n t \quad (18-6)$$

其中：

$$\omega = \frac{2\pi}{D}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (系统无阻尼固有频率)}$$

$$\xi = \frac{c}{2m}$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \xi^2} \text{ (系统有阻尼固有频率)}$$

从 18-6 式可见，单自由度系统受冲击激励后所产生的响应与激励脉冲的幅值，持续时间以及系统的固有频率、阻尼有关。

首先讨论阻尼对冲击响应的影响。当阻尼 $C=0$ 时，系统的响应幅值最大，而且在最大响应后产生稳定的正弦震荡。当阻尼 $C=\infty$ 时，系统的响应幅值为零。当阻尼在 $0 < C < \infty$ 之间时，系统在最大响应后便是一个衰减振荡，其程度与激励脉冲的幅值，持续时间和系

统的固有频率有关。由于冲击是一个暂态过程，所以，阻尼对冲击响应的影响实际上并不大，因此一般的冲击响应谱均为无阻尼的响应。可见在谈论一个冲击响应谱时，若未加特别说明，通常是指无阻尼时的冲击谱。这样做的好处是，把无阻尼时的响应作为系统响应的上限，可以代表实际使用时的最坏情况，既以无阻尼时的响应作为产品抗冲击强度的标准，将使所研究的问题更简化。在无阻尼时，冲击是响应（即 11-6 式）将简化为下列形式：

$$x(t) = \frac{A\omega}{\omega_n(\omega_n^2 - \omega^2)} \sin \omega_n t + \frac{A}{\omega_n^2 - \omega^2} \sin \omega t \quad (18-7)$$

系统受冲击的最大响应可能出现在激励脉冲的持续时间内，也可能在激励脉冲的持续时间后（即激励脉冲停止后）。其决定因素是看激励脉冲的持续时间 D 和系统的固有周期 T 的比值。图 18-9 为同一峰值和持续时间的半正弦脉冲对不同固有周期系统所造成的响应曲线。

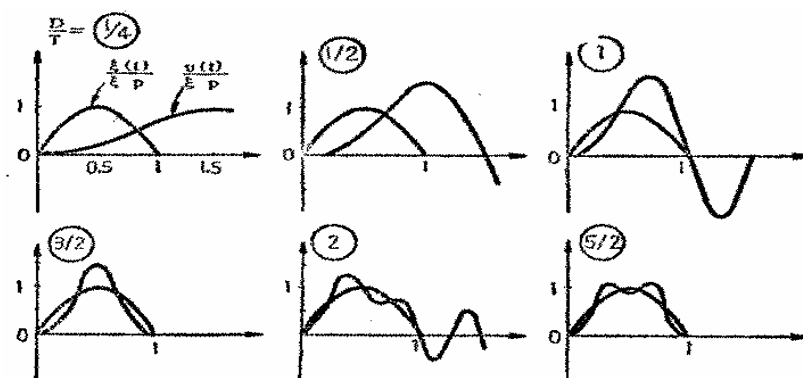


图 18-9 同半正弦脉冲对不同固有周期系统所造成的响应

从图 18-9 的六条响应曲线可见，由于 D/T 比值的不同，系统所产生的最大响应和最大响应出现的时间也不相同。一般我们将激励脉冲持续时间内出现的最大响应称初始响应，将激励脉冲持续时间后出现的最大响应称残余响应，图 18-9 是某一单自由度系统受冲击后响应的全过程。

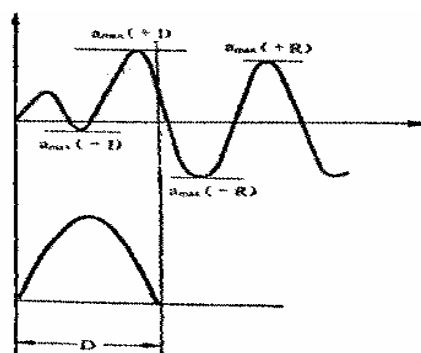


图 18-10 某一单自由度系统受冲击后响应的全过程。

根据图 18-9 和图 18-10 的思路，我们把一典型的电子产品中的每一结构单元简化为具有刚性质量块 m 、无阻尼弹簧 k 、阻尼器 c 所组成的单自由度系统。然后将这些不同固有频率的单自由度系统排列起来安装在同一基础上，并让基础受到一冲击脉冲的激励，如图 18-11 所示：

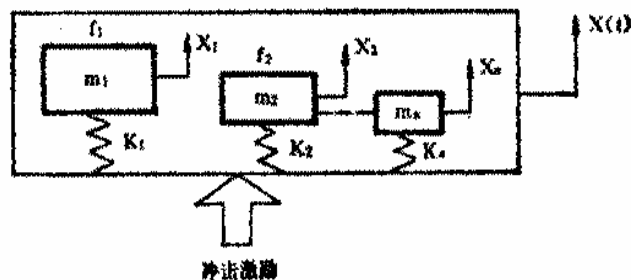


图 18-11 单自由度系统族

然后，将各单自由度系统受冲击后的初始响应和残余响应分别以系统的固有频率为函数排列起来并描成曲线，这便是冲击响应的谱曲线。其中反映初始响应的曲线称初始冲击的响应谱；反映残余响应的曲线称残余冲击响应谱。又由于系统冲击所产生的响应发生在正负两个方向上，所以又有：

正初始冲击响应谱 (+I)：指在冲击脉冲持续时间内与激励脉冲同方向上出现的最大响应曲线。

负初始冲击响应谱 (-I)：指在冲击脉冲持续时间内与激励脉冲相反方向上出现的最大响应曲线。

正残余冲击响应谱 (+R)：指在冲击脉冲持续时间后与激励脉冲同方向上出现的最大响应曲线。

负残余冲击响应谱 (-R)：指在冲击脉冲持续时间后与激励脉冲相反方向上出现的最大响应曲线。

由于正初始冲击响应谱在任何时候都比负初始冲击响应谱大，又由于正负残余冲击响应谱互相对称，如图 18-12 所示：

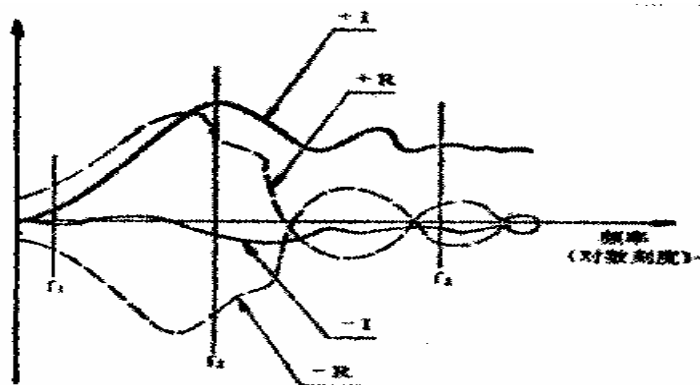


图 18-12 单自由度系统族的冲击响应谱

又由于冲击试验又是在六个方向上进行的（即沿着每个轴线的相反两个方向进行），所以一般只画出正初始冲击响应谱和正残余冲击响应谱。

18.3.3.2 三种标称冲击脉冲的冲击谱图

上面是以半正弦冲击脉冲为例介绍如何得出冲击响应谱（下称冲击谱）。用同样的方法可以得出后峰锯齿波，梯形波的冲击谱。图 18-13 为半正弦，后峰锯齿，梯形三种标称冲击脉冲的冲击谱图：

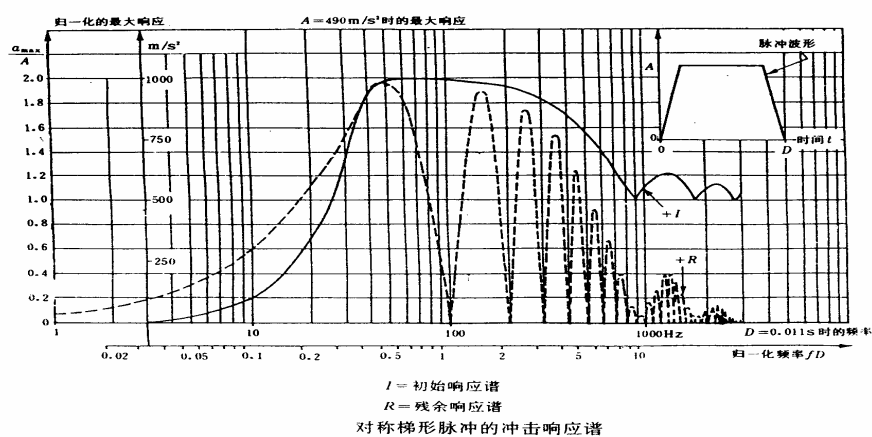
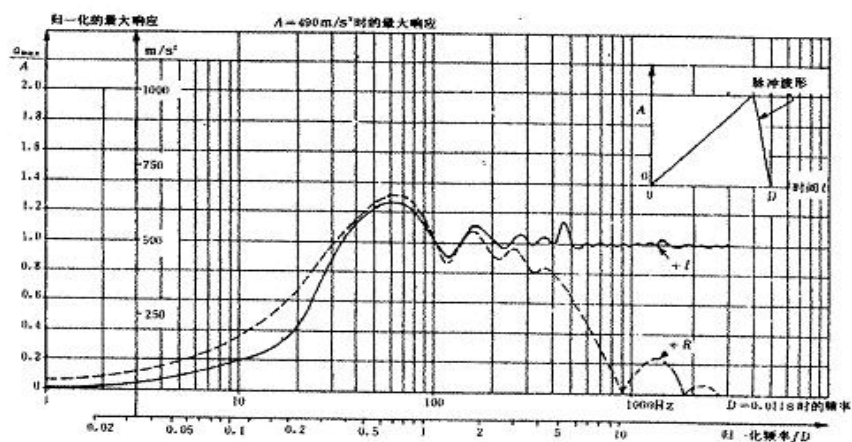
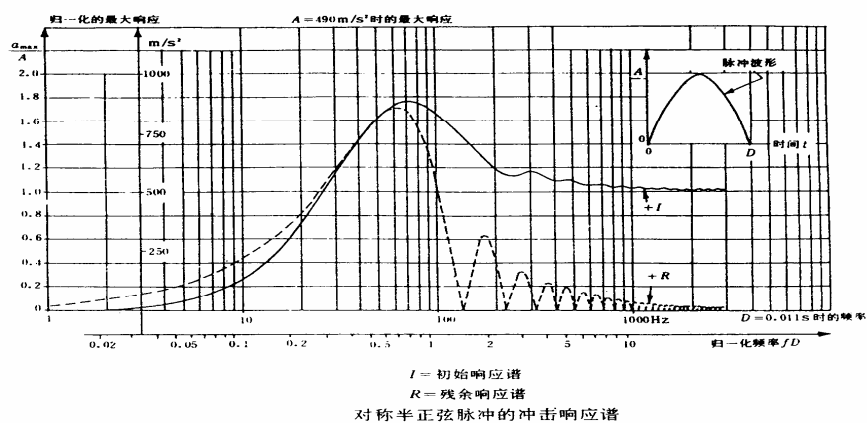


图 18-13 为半正弦，后峰锯齿，梯形三种标称冲击脉冲的冲击谱图

18.3.3.3 冲击响应谱试验

直接用冲击响应谱进行试验通常比用标称脉冲进行试验更真实

(1) 国军标 GJB150 和美国军标 MIL810F 中冲击响应谱试验要求

国军标 GJB150 和美国军标 MIL810F 中给出了地面设备和空中设备的冲击响应谱试验条

件要求和曲线分，并分别见表 18-2 和图 18-14。从表 18-2 和图 18-14 可见，作为试验条件(严酷等级)参数，冲击响应谱试验给出的是要求是：

- 达到的响应加速度;
- 转换频率(交越频率);
- 有效瞬态持续时间。

表 18-2 试验用冲击响应谱

试验程序	峰值加速度 (g ¹ s)	T _e (ms)	交越频率(Hz)
飞行装备功能试验	20	15-23	45
地面装备功能试验	40	15-23	45
飞行装备坠撞安全试验	40	15-23	45
地面装备坠撞安全试验	75	8-13	80

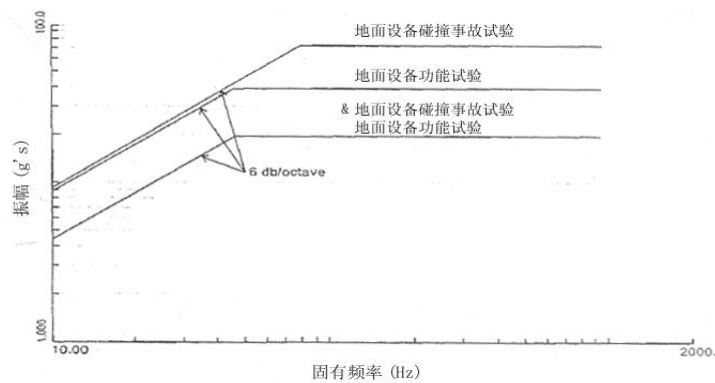
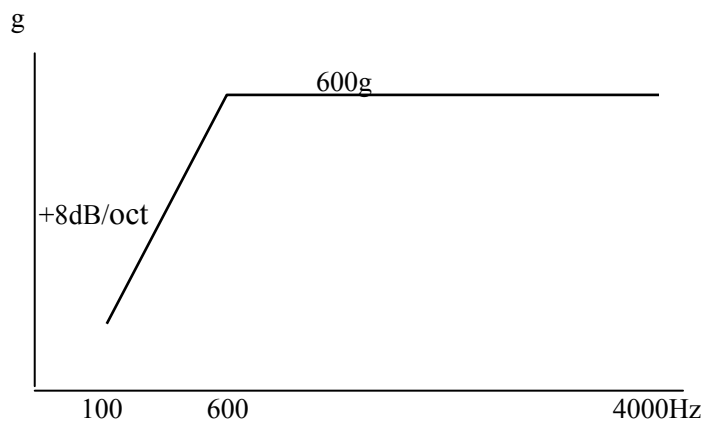


图 18-14 试验用冲击响应谱

(2) 常用的冲击响应谱试验要求

图 18-14 给出了某规范规定的冲击响应谱，这是一种常用的冲击响应谱的试验条件(严酷等级)参数，用常用的冲击响应谱试验要求方法进行试验时，其试验条件要给出::冲击响应谱的形状(包含转换频率)、量级、Q 值、试验次数。下图 18-15 为某项产品冲击试验条件要求的冲击谱：



18-15 规范规定的冲击响应谱

100 Hz ~ 600 Hz +8dB/oct
600 Hz ~ 4000 Hz 600g

$$Q = 10$$

X、Y、Z 三轴向 每轴向：三次

18.3.3.4 容差

在进行冲击响应谱试验时，往往有很宽的频率范围，此时要满足整个频率范围内的容差要求往往非常困难，在这种情况下：

(1). 如果样品没有典型的低频模态响应，那么为了满足冲击响应谱的高频部分，允许冲击响应谱的低频部分不受容差的限制(高频部分从低于样品的一阶固有频率的倍频开始计算)。持续时间应保持在容差范围内。

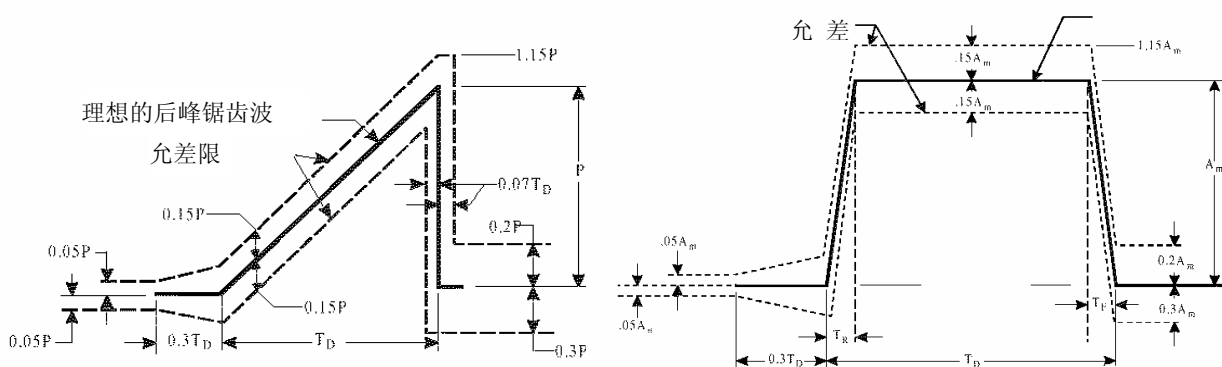
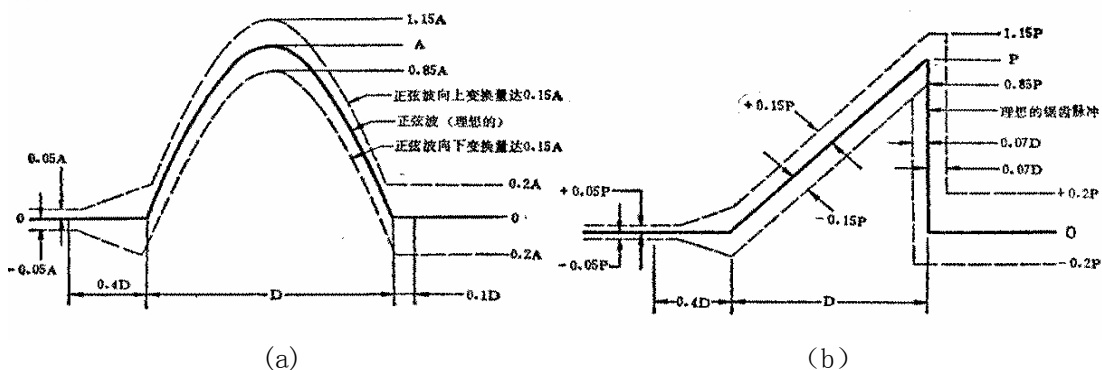
(2) 如果样品没有典型的高频模态响应，那么为了满足冲击响应谱的低频部分，允许复杂瞬态脉冲持续时间不受容差的限制(假定复杂瞬态脉冲持续时间不超过 $T_e + 1/(2f_{\min})$)。

18.4 对试验设备的要求

能产生冲击的设备很多，电动振动台是最主要的一种，它既能产生冲击响应谱与重现场的冲击时间历程，也能产生标称冲击脉冲波形。然而能产生标称冲击脉冲波形的设备除电动振动台外，还有：自由跌落式、压缩空气式、气液压式、动量转换式。无论采用何种试验设备来产生冲击，对它们的要求是一样的。这里的要求与检定(校)对试验台的要求一样，即不是指冲击试验设备空载时的要求，而是指冲击试验设备装上样品（包括夹具）和必要的负载后，在检测点上所应达到的要求。

18.4.1 冲击脉冲的波形容差

在规定标称冲击脉冲波形的方法中，目前对标称冲击脉冲的波形容差要求，军标和民（商）标有些差别。下图 18-16 (a) 和 (b) 是美国军标 MIL-STD-810C/D/E 和国军标 GJB150 中的要求；下图 18-16 (c) 和 (d) 是美国军标 MIL-STD-810F 中的谱形。在 MIL-STD-810F 中，后峰锯齿波主要用于功能冲击和坠撞安全冲击，梯形脉冲波主要用于有包装设备的试验和易损性试验。对有包装的设备，在包装前、包装中和包装后的偶然跌落，其功能必须正常；对易损性试验要求产品既保证功能又保证结构不受损伤，对由跌落和易损性要求的高速度和大的速度变化量，其梯形脉冲波最能做到这一点。



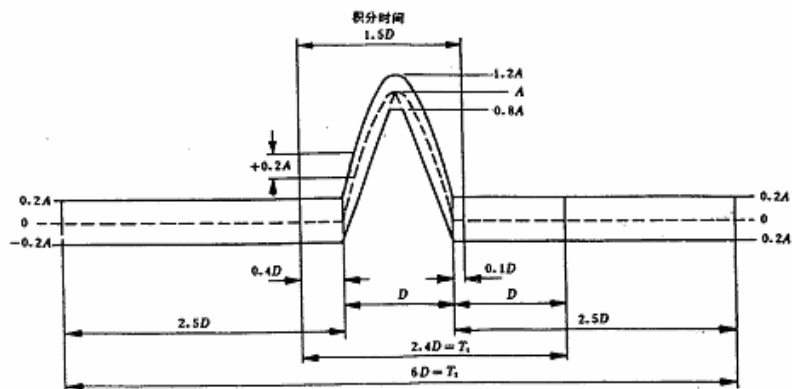
(c)

(c)

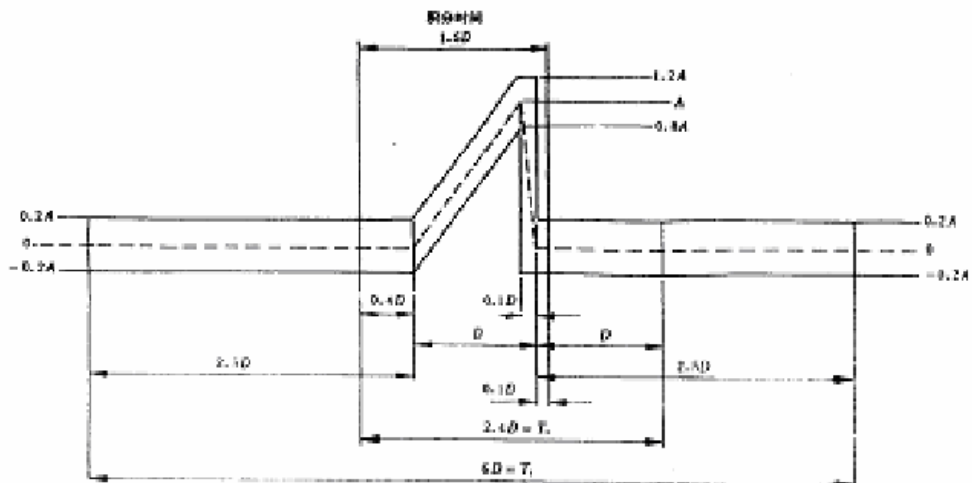
(d)

图 18-16 美军标 810C/D/E/F 和国军标 GJB150 中的要求

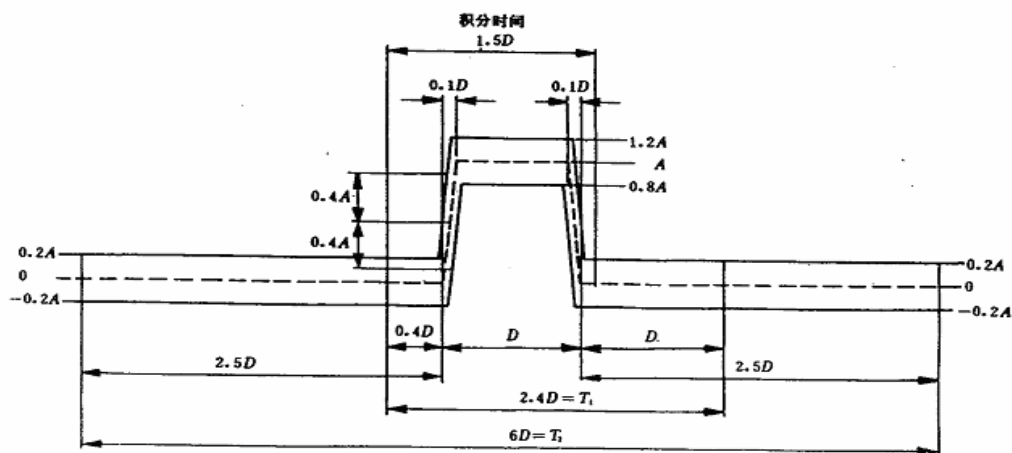
下图 18-17 是国标和 IEC 标准中的标称冲击脉冲的波形容差要求。上世纪 80 年代前期，国标和 IEC 标准中的标称冲击脉冲的波形容差要求也与图 18-16 中的一样，后考虑到经多年实践，冲击机要达到图 18-16 中要求有困难（当时还没有解决用电动振动试验系统进行冲击试验的问题），而放宽到现图 18-17 所示的容差要求的。当然，现用电动台产生标称冲击脉冲波形，相对一般跌落式冲击机，没有许多附加的高次谐波，是比较容易达到。但也存在要产生很大的速度和速度变化量的困难（见 18.4.2），在这种情况下，仍然要用跌体式冲击台等设备来进行。



(a) 半正弦冲击脉冲波



(b) 后峰锯齿冲击脉冲波



(c) 梯形冲击脉冲波

图 18-17 国标和 IEC 标准中的标称冲击脉冲的波形容差

在冲击试验中，要使一个冲击脉冲波形符合容差要求，并控制在图 18-15 和图 18-16 所示的容差带内。可通过调整冲击台、夹具和安装，使检测点上的冲击脉冲波形落在容差界线内。

18.4.2 冲击脉冲的速度变化容差

冲击脉冲的速度变化量是指标称脉冲所包围的面积，冲击脉冲的速度变化量按下表 18-3 所给出的公式计算。

表 18-3 三种冲击脉冲的速度变化量

半正弦波	后峰锯齿波	梯形波
$\Delta V = \frac{2}{\pi} AD$	$\Delta V = 0.5AD$	$\Delta V = 0.9AD$
式中： ΔV - 速度变化量 单位：m/s A - 峰值加速度 单位：m/s ² D - 脉冲持续时间 单位：ms		

冲击脉冲的速度变化量意味着冲击能量的大小。冲击台所产生的冲击脉冲波形合格后，其速度变化量也必须合格。速度变化容差通常为标称脉冲速度变化量的±10%或±15%。若冲击台所产生的冲击脉冲波形都是沿着下限容差线合格的，则该冲击脉冲所包围的面积，即冲击能量，就达不到标称脉冲速度变化量的-10%或-15%的要求。在选用电动振动台进行冲击试验，除要考虑它的推力是否能满足外，还要考虑电动振动台的速度变化量是否能达到，当前电动振动台的速度可达 2m/s，其速度变化量一般最大可到 4m/s。例如要用电动振动台做 50g、11ms 的半正弦冲击脉冲冲击试验时，要求电动振动台的速度变化量达 3.4 m/s，此时推力也可达到，则就可用该电动振动台进行冲击试验。如果要做的不是半正弦冲击脉冲，而是 50g、11ms 的梯形冲击脉冲冲击试验，此时要求的速度变化量为 4.9 m/s，则就不能用电动振动台来进行冲击试验。同理，要进行 200g、6ms 的半正弦冲击试验，由于变化量要求 7.5 m/s，也不能用电动振动台来完成冲击试验，在这种情况下，都要考虑用其它形式的冲击台来完成试验。

18.4.3 波纹幅值及脉冲持续时间容差

有的标准除规定波形容差，速度变化容差外，为了更严格地限制冲击脉冲，提高试验的再现性，还规定了波纹容差和脉冲持续时间容差，例如美国国家标准 ANSI S2.14-1947 中规定：

(1) 波纹容差

叠加在脉冲上的波纹幅值为最大平滑加速度的 $\pm 20\%$ 。

(2) 持续时间容差

持续时间:	$\geq 2\text{ms}$	$\pm 0.6\text{ms}$ 或 $\pm 15\%$ 取大者
	$< 2\text{ms}$	$\pm 0.1\text{ms}$ 或 $\pm 30\%$ 取大者
上升时间	$> 1\text{ms}$	$\pm 0.3\text{ms}$ 或 $\pm 15\%$ 取大者
	$0.05 \sim 1\text{ms}$	$\pm 30\%$
	$< 0.05\text{ms}$	不规定

18.4.4 冲击响应谱的容差

对冲击响应谱的容差目前尚未见规范化的规定，大都是按各工程的需要来给出的，例如：有的试验要求在 $1/6$ 倍频程的频率分辨率点上有 $1/3$ 点，其值超过轨定值就达到要求了；

有的规定为从 10Hz 到 2kHz 的频带内为 -1.5dB 到 $+3\text{dB}$ 之间，对于 10Hz 到 2kHz 以的频带频率带规定为 -3dB 到 $+6\text{dB}$ 之间。

冲击响应谱的容差要求还可见本书 18.3.3.4。

18.4.5 横向运动

在冲击试验中对横向运动的要求位：垂直于规定冲击方向上的正的或负的峰值加速度应不超过规定方向上的峰值加速度的 $\pm 30\%$ 。

18.5 对测量系统的要求

由于冲击在频域中是一个连续谱，并且具有无限带宽。因此要准确无误地测出冲击的峰值加速度，脉冲持续时间和速度的变化量，特别是要不失真的重现冲击脉冲的实际波形，就要求测量系统对无限带宽的频率成分能不失真的传递，也就是测量系统的通频带必须无限宽。又由于时域波形是一个各频率上的能量信号叠加而成的，而且周期信号的叠加还有一个相位的问题，即同一幅值的频谱，用不同的相位合成，可形成不同的波形。可见若测量系统限制信号相位的传递，也将导致脉冲波形失真。因此，对测量系统还有一个相位线性度的要求。

目前，国内外的冲击测量系统通常有传感器、信号适调器、放大器、低通滤波器、记录和指示仪表等组成，其方框图如图 18-18 所示。

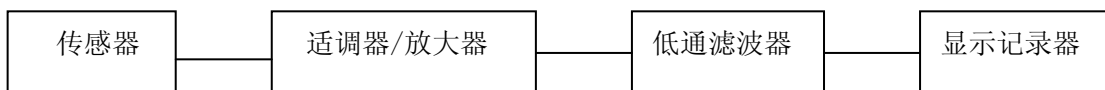
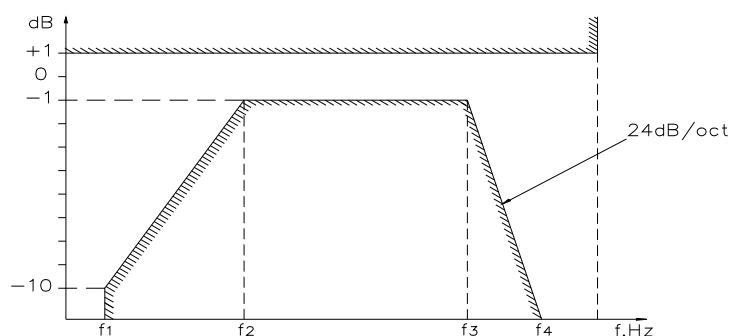


图 18-18 冲击测量系统方框图

上面所述的对幅频特性和相频特性的要求，是指对图 18-18 中整个测量系统的要求。实际上，这两种要求是相互关联的，无相位畸变的要求可以转化为对幅频特性的要求，所以，目前国内外对冲击测量系统的要求，一般只提对幅频特性的要求。国标和 IEC 等标准对冲击测量系统的要求如图 18-19 所示：



持续时间 ms	截止频率 Hz		高截止频率 kHz	响应超过+1dB 时的频率 kHz
	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄
0.2	20	120	20	40
0.5	10	50	15	30
1	4	20	10	20
3	2	10	5	10
6	11	4	2	4
11	0.5	2	1	2
18 和 30	0.2	1	1	2

图 18-19 测量系统的频率特性

从图 18-19 可见，对测量系统的要求，主要是对低截止频率，高截止频率、高截止频率后的下降斜率的要求。

作为一般的电学测量系统，它的幅频特性不可能一直平坦地延伸到零频。因此，测量系统本身的有限的低频特性将会导致冲击脉冲波形低频分量被丢失或被衰减，从而造成失真，并表现在冲击脉冲波形的后沿下冲上，所以对测量系统有一个低截止频率的要求。即实际所用测量系统的低端必须在图 18-19 中 f₁ 到 f₂ 曲线的左边，并以 f₁ 到 f₂ 的曲线为上限。

为了保证测量系统能不失真地重现被测冲击脉冲，测量系统的高截止频率必须足够高，否则将会造成冲击脉冲的高频成份被丢失或衰减，从而影响到冲击脉冲波形前后沿的陡直度和顶部的平坦度而造成失真。从理论上讲，为了保证失真度小于 5%，对半正弦、

后峰锯齿、梯形三种冲击脉冲，高截止频率 $f_3 \geq \frac{3-5}{D}$ 就可以了。但目前国内外的冲击机

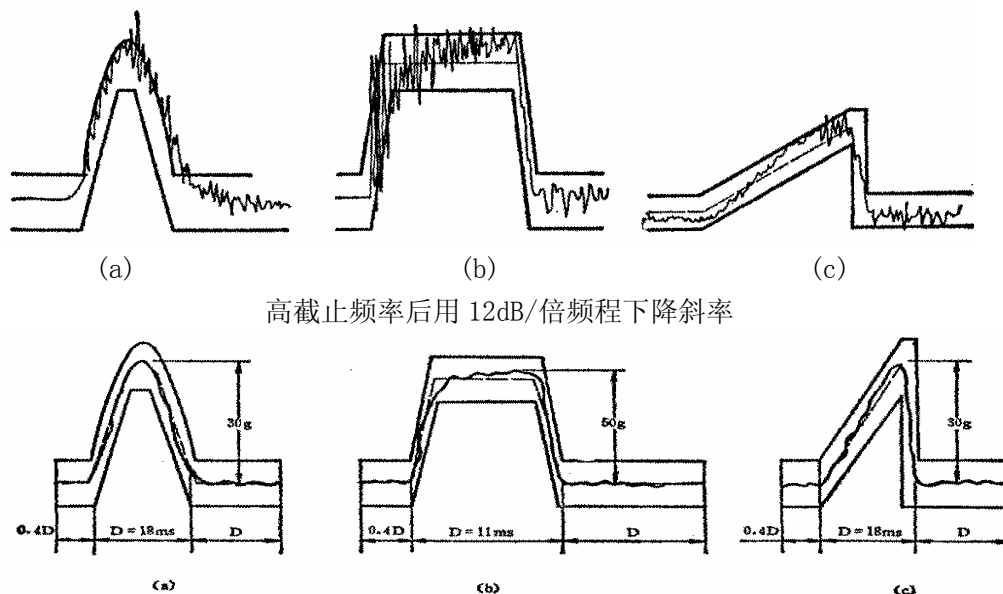
（不包含用电动振动台产生冲击脉冲冲击）在产生上述三种冲击脉冲时，都带有一定数量的高次谐波，而这种高次谐波对产品的失效是会有影响的。为了将这些谐波测出来，以方便

分析产品的失效原因，所以一般都将 f₃ 取到 $\frac{10}{D}$ 左右，对特别高的加速度和特别窄的脉冲，

例如 1500g、0.5ms；3000g、0.2ms，由于当前在冲击机制造技术上的问题，在产生冲击脉冲的同时，往往带有丰富的高次谐波（用电动振动台产生冲击脉冲冲击会好些）。此时若用 $\frac{10}{D}$

来确定 f₃，就难以确定基本脉冲的波形和幅值了（冲击机也难以合格）。因此通常将 f₃ 规定得低一些。

在高截止频率相同的情况下，由于下降斜率不同，所测出来的结果也不一样，这就有一个高截止频率的下降斜率要求（下称下降斜率）。从图 18-19 可见，下降斜率为 24dB/倍频程。可见，测量系统的频率特性曲线过了 f₃ 以后，只要在下降斜率线的右边就都是合格的，即不管是以 6dB/倍频程下降，还是 12dB/倍频程下降都是符合要求的。但由于目前国内外的各种冲击机所产生的冲击脉冲都带有一定的高次谐波（用电动振动台产生冲击脉冲冲击会好些），所以下降斜率愈低，被测入的高次谐波就多，就愈易使冲击机所产生的冲击脉冲波形达不到容差要求。图 18-20 是同一种冲击脉冲，在 f₃ 相同的情况下，分别用 12dB/倍频程和 24dB / 倍频程下降斜率的比较。



高截止频率后用 24dB/倍频程下降斜率

图 18-20 下降斜率对冲击脉冲波形的影响

从图 18-20 可见，用 12dB/倍频程下降斜率滤波，波形超差不合格；用 24dB/倍频程下降斜率滤波就不超差合格。这说明在检测冲击机所产生的冲击脉冲波形是否合格时，应以图 18-720 的 24dB/倍频程下降斜率为合格标准的下限。也就是说 12dB/倍频程下降斜率时合格更好。若 12dB/倍频程时不合格，也不能说明冲击机所产生的脉冲波形不合格，而应以 24dB/倍频程下降斜率作为判断合格的标准。

目前国内外的绝大多数冲击测量仪器是 12dB/倍频程下降斜率，这就不能完全满足图 18-19 所示的测量系统的要求，而且通常是高通滤波器包含在电荷放大器之中，例如现仍有单位在用丹麦的 2626 型、2635 型、2650 型，以及各种国产相归老的测振仪都是这样。为了解决这一问题和充分利用现有仍可用仪器，可在电荷放大器之后，加一个下降斜率为 24dB/倍频程的低通滤波器，如图 18-21 所示：

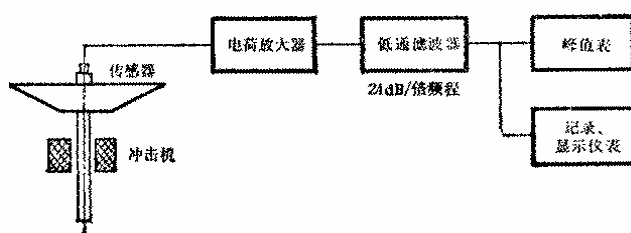


图 18-21 测量系统方框图

测量时，电荷放大器的高截止频率取线性，而插入的低通滤波器的高截止频率则根据被测脉冲的持续时间按图 18-21 中的数值进行选择，其它均不变。

18.6 试验程序

冲击试验的整个试验过程比较简单，由预处理、初始检测、预调、试验、恢复、最后检测几个步骤组成。下列两步有别于其它试验，是本试验的重点，应理解和掌握好。

18.6.1 预调

在进行冲击试验时，样品的重量和动态特性可能会对冲击试验设备的性能产生影响，

同时,冲击试验所规定的试验条件(严酷等级)又是指冲击试验设备装上样品(包括夹具)和必要的负载后,在检测点上应达到的要求,因此,为了保证样品经受到所规定的试验条件(严酷等级)和达到高的再现性(不确定),应做好试验前的预调。

预调前,首先应选好检测点,通常选择在样品与台面或样品与夹具的连接处。

预调时,可带样品进行,也可不带样品进行。如果样品的重量和动态特性对冲击台的性能没有影响,则可不带样品,在冲击试验设备空载的情况下进行预调。此时检测传感器安装在台面上或夹具上,并尽量靠近台面中心。如果样品的重量和动态特征对冲击台的性能有影响,则应装上样品进行预调。为了避免正式试验前的重复冲击给样品带来不必要的损伤,通常装上非正式试验用样品进行预调。在进行这种预调时,如果样品昂贵或能提供试验的样品很少,则可用一个不合格的样品或用一具有恰当重心位置的立体模型来进行。但必须指出,这种立体模型不可能有与真实样品有完全相同的动态特性,此点应充分注意到。

18.6.1 试验

冲击试验设备预调结束后,就正式装上样品进行试验。通常是在样品的三条互相垂直轴线的六个方向上进行(一般的冲击机可通过夹具和改变安装来实现;用电动振动台进行冲击试验,可通过垂直台和水平台来共同实现),即进行 $3 \times 6 = 18$ 次冲击。对结构和性能完全对称的样品,可省去相应轴线和方向上的冲击次数。冲击试验在大多数情况下是用来考核产品经受住冲击的能力,所以,通常在非工作状态下进行冲击。对在运载工具上工作的产品,通常要进行性能冲击和结构强度(军标中有的称坠撞安全冲击)二种冲击,前者考虑的是在一般冲击下要能正常工作;后者考虑的是在偶然出现的特大冲击下其结构不能出现损伤。特别是产品不产生分离、抛出、甩出而击伤人等。当一个产品要进行二种冲击时,通常是先完成性能冲击,然后再进行强度(坠撞安全)冲击,试验时通常是在一条轴线上完成二种冲击后,再依次完成另外二条轴线上的冲击。

18.8 合理选择试验所需的冲击脉冲波形

对半正弦,后峰锯齿,梯形三种冲击脉冲,在试验如何进行正确的选择是一个值得注意的问题。特别是对试验室只具备产生半正弦冲击脉冲的冲击台,而不具备产生后峰锯齿、梯形冲击脉冲冲击台的情况更是如此。另外当进行大加速度大脉宽的冲击试验时,而要求大的速度变化量,而用电动振动台又无法做到时,也可参考此节进行。

为了说明如何进行合理的选择,首先请看前面的图 18-13:

图 18-13 是相同峰值和相同的脉冲持续时间的半正弦,后峰锯齿,梯形三种冲击脉冲对同一单自由度系统的冲击响应谱。从图中可见:

当脉冲持续时间 D 和产品的固有频率 f_n 的乘积小于或等于 0.2 时,三种脉冲的初始响应谱近似相同,残余响应谱与脉冲波形的速度变化量(波形面积)成正比。此时,只要速度波变化量相同,就可选择三种冲击脉冲中的任一种来做试验。也就是说,当 $f_n \cdot D \leq 0.2$ 时,用任何一种脉冲来进行试验,其效果是一样的。

当脉冲持续时间 D 和产品的固有频率 f_n 的乘积大于 0.2 并小于 10 时,三种脉冲的初始响应谱和残余响应谱均不相同。其中,梯形脉冲的初始响应谱的最大值最高,而且由于梯形脉冲的加速度时间历程曲线有平的峰值,所以初始响应谱的最大值能维持在较宽的频率范围上。半正弦脉冲的初始响应谱的最大值次之(大约比梯形脉冲低 30%),后峰锯齿脉冲的初始响应谱的最大值最小(大约比梯形脉冲低 51%)。从残余响应谱来看,后峰锯

齿脉冲的比较平滑,直到 $f_n \cdot D=10$ 附近才达到第一个零值。半正弦脉冲和梯形脉冲由于本身的对称性,从 $f_n \cdot D=10$ 开始就反复出现零值。可见当 $0.2 \leq f_n \cdot D \leq 10$ 时,应根据试验的目的和产品的具体用途来选择所需的脉冲。当冲击脉冲的持续时间 D 和产品的固有频率 f_n 的乘积大于 10 时,三种脉冲的初始响应谱均近似 1 ($a_{\max}/A=1$),而残余响应谱均近似为零。此时,选择三种脉冲中的任一种来进行试验,其效果是一致的。

18.9 将后峰锯齿、梯形两种脉冲转换成半正弦脉冲进行试验

前面已经讲到,当脉冲的持续时间 D 和产品的固有频率 f_n 的乘积在 0.2 到 10 之间时,应根据试验目的来选择所需的脉冲。这就给我们提出一个问题,如果按照需要应选择后峰锯齿脉冲或梯形脉冲,而试验室又不能产生这二种冲击脉冲波形,特别是上面所说的其速度变化量超过电动振动台速度变化量的梯形脉冲时,或能产生但容差又达不到要求。此时如何解决呢?我们可以利用冲击谱将这两种冲击脉冲转换成半正弦冲击脉冲来进行试验。其方法有下列两种:

18.9.1 峰值等效

对单自由度系统,对结构和动态特性比较简单的样品,例如,电子元器件,可通过峰值等效的方法将后峰锯齿、梯形两种脉冲转换成半正弦脉冲来进行试验。举例如下:

例 1: 有一固有频率 $f_n=100\text{Hz}$ 的样品,原需用 100g、11ms 的梯形脉冲进行试验,由于电动台的速度变化量达不到,要将其转换成 6ms 的半正弦脉冲来进行试验,此时的峰值加速度应为多少?

解: 首先求出 $f_n \cdot D$ 的乘积:

$$f_n \cdot D = 100\text{Hz} \times 0.011 = 1.1$$

再从梯形脉冲的冲击谱曲线(图 18-13)上查 $f_n \cdot D = 1.1$ 处的无量纲响应,其数值为 1.95,可见产品用梯形脉冲进行试验时,其响应加速度为 $100\text{g} \times 1.95 = 195\text{g}$ 。

然后再从半正弦脉冲的冲击谱曲线(图 18-16)上查 $f_n \cdot D=0.6$ 处的无量纲响应,其数值为 1.65。可见为了得到 195g 的响应加速度,半正弦脉冲的激励峰值应为:

$$A = 1.95/1.65 \times 100 \approx 118\text{g}$$

从上面的计算可见,100g、11ms 的梯形脉冲转换成 6ms 半正弦脉冲来进行试验时,其半正弦脉冲的峰值加速度应为 118g。

例 2: 有一固有频率为 50Hz 的样品,原需要用 100g、11ms 的后峰锯齿脉冲来进行试验,由于试验室没有能产生后峰锯齿脉冲的设备,要将其转换 6ms 的半正弦脉冲来进行试验,此时的峰值加速度应为多少?

解答: 首先求出 $f_n \cdot D$ 的乘积:

$$f_n \cdot D = 50\text{Hz} \times 0.011 = 0.55$$

再从后峰锯齿脉冲冲击谱曲线(图 18-16)上查 $f_n \cdot D=0.55$ 的无量纲响应,其数值为 1.20,可见产品用后峰锯齿脉冲进行试验时,其响应加速度为 120g。

再从半正弦脉冲的冲击谱曲线(图 18-6)上查 $f_n \cdot D=0.55$ 处的无量纲响应,其数值为 1.62。可见为了得到 120g 的响应加速度,半正弦脉冲的激励峰值应为:

$$A = 1.2/1.62 \times 100 = 74\text{g}$$

从上面的计算可见,100g、11ms 的后峰锯齿脉冲转换成 6ms 的半正弦脉冲时,其半正弦脉冲峰值加速度仅为 74g。

例 3: 有一个固有频率为 100Hz 的样品,原需要用 200g、3ms 的梯形脉冲来进行试验,现要转换成 200g 的半正弦脉冲来进行试验,此时的脉冲持续时间应为多少?

解答：首先求出 $f_n \cdot D = 100 \times 0.003 = 0.3$

再从梯形脉冲的冲击响应谱曲线（图 18-16）上查 $f_n \cdot D = 0.3$ 处的无量纲响应，其数值为 1.13，可见产品用梯形脉冲做试验时，其响应加速度为 $200g \times 1.13 = 226g$

然后再从半正弦脉冲的冲击响应谱曲线（图 18-16）上查无量纲响应为 1.13 处的 $f_n \cdot D$ 的乘积，其数值为 0.32。

计算： $f_n \cdot D = 0.32$ ；

$100\text{Hz} \cdot D = 0.32$ ；

$D = 3.2\text{ms}$ 。

从上面的计算可见：200g、3ms 的梯形脉冲转换成 200g 的半正弦脉冲时，其脉冲持续时间应为 3.2ms。

18.9.2 用包络整个冲击谱的方法等效

对结构的动态特性复杂的产品，对多自由度系统，可采用包络整个冲击谱的方法来等效。

（1）用半正弦脉冲的冲击谱来包络后峰锯齿脉冲的冲击谱，从而达到将后峰锯齿脉冲转换成半正弦脉冲进行试验的目的。

对后峰锯齿脉冲，从图 18-13 的冲击谱曲线可见，其最大无量纲响应 $a_{\max}/A = 1.32$ ，对应的无量纲频率 $f_n \cdot D = 0.7$ 。

对半正弦脉冲，从图 18-13 的冲击谱曲线可见，其最大无量纲响应 $a_{\max}/A = 1.78$ ，对就的无量纲频率 $f_n \cdot D = 0.8$ 。

现举例说明如何用包络整个冲击谱的方法等效，从而达到将后峰锯齿脉冲转换半正弦脉冲进行试验的目的。

例 1：15g、11ms 的后峰锯齿脉冲要求转换成半正弦脉冲来进行试验，此时半正弦脉冲的峰值加速度和脉冲持续时间应为多少？

解答：∵后峰锯齿脉冲的最大无量纲频率 $f_n \cdot D = 0.7$ ；

∴在 11ms 时能产生最大响应的样品的固有频率；

$f_n = 0.7 / D = 0.7 / 0.011 = 63.7\text{Hz}$ ；

又∵后峰锯齿脉冲的最大无量纲响应为 1.32；

∴样品的最大响应加速度为 $15g \times 1.32 = 19.8g$ 。

下面用冲击谱包络法将后峰锯齿脉冲转换成半正弦脉冲。首先使两种脉冲对产品的最大响应加速度相等。

∵半正弦脉冲的最大无量纲响应为 1.78；

∴用半正弦脉冲试验时所需的激励峰值加速度为：

$a_{\max}/A = 1.78$, $19.8 / A = 1.78$, $A = 11.12g$ ；

又∵半正弦脉冲的最大无量纲频率 $f_n \cdot D = 0.8$ ；

∴用半正弦脉冲试验时的脉冲持续时间为：

$f_n \cdot D = 0.8$, $63.7 \cdot D = 0.8$ $D = 12.5\text{ms}$ 。

当半正弦冲击脉冲和后峰锯齿冲击脉冲的最大响应相同时，由于半正弦脉冲的冲击响应谱的高频部分不能完全包络后峰锯齿脉冲相应冲击响应谱的高频部分，为提高产品抗冲击的安全系统，需将半正弦冲击脉冲的峰值加速度提高 14%。即 $11.12g \times 1.14 = 12.68g$ 。此时半正弦冲击脉冲的冲击响应谱就完全能包络后峰锯齿冲击脉冲的冲击响应谱了，如图 18-22 所示。可见，采用包络整个冲击响应谱的方法来等效时，15g、11ms 的后峰锯齿冲击脉冲需用 12.68g、12.5ms 的半正弦冲击脉冲来进行试验。

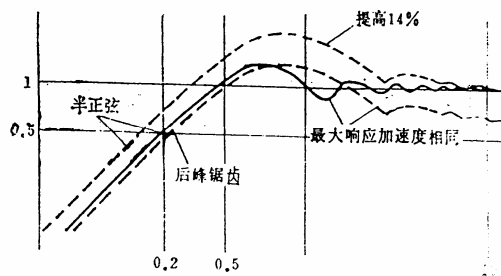


图 18-22 半正弦冲击脉冲的冲击响应谱包络后峰锯齿冲击脉冲的冲击响应谱

(2) 用半正弦脉冲的冲击谱来包络梯形脉冲的冲击谱，从而达到将梯形脉冲转换成半正弦脉冲进行试验的目的。

对梯形冲击脉冲，从图 18-13 中的梯形冲击脉冲冲击谱曲线可见，其最大无量纲响应 $a_{\max}/A=1.994$ ，对就的无量纲频率 $f_n \cdot D=0.6$ 。

现举例说明如何用包络整个冲击谱的方法等效，从而达到将梯形脉冲转换半正弦脉冲进行试验的目的。

例 2: 15g、11ms 的梯形脉冲要求转换成半正弦脉冲来进行试验，此时半正弦脉冲的峰值加速度和脉冲持续时间应为多少？

解答：∵ 梯形脉冲的最大无量纲频率 $f_n \cdot D=0.6$ ；

∴ 在 11ms 时能产生最大响应的样品的固有频率；

$$f_n = 0.6 / D = 0.6 / 0.011 = 54.5 \text{ Hz};$$

又∵ 后峰锯齿脉冲的最大无量纲响应为 1.994；

$$\therefore \text{样品的最大响应加速度为 } 15\text{g} \times 1.994 = 29.9\text{g}。$$

下面用冲击谱包络法将梯形脉冲转换成半正弦脉冲。首先使两种脉冲对产品的最大响应加速度相等。

∵ 半正弦脉冲的最大无量纲响应为 1.78；

∴ 用半正弦脉冲试验时所需的激励峰值加速度为：

$$a_{\max}/A=1.78, 29.9 / A = 1.78, A = 16.8\text{g};$$

又∵ 半正弦脉冲的最大无量纲频率 $f_n \cdot D=0.8$ ；

∴ 用半正弦脉冲试验时的脉冲持续时间为：

$$f_n \cdot D=0.8, 54.5 \text{ Hz} \cdot D = 0.8 \quad D=14.7\text{ms}。$$

同例 1 一样，在最大响应相同时，还必须将半正弦脉冲的峰值加速度提高 28%，才能完全包络，见图 18-23 所示。所以采用包络整个冲击响应谱的方法来等效时，15g、11ms 的梯形冲击脉冲需用 $16.8\text{g} \times 1.28 = 21.5\text{g}$ 、14.7ms 的半正弦冲击脉冲来进行试验。

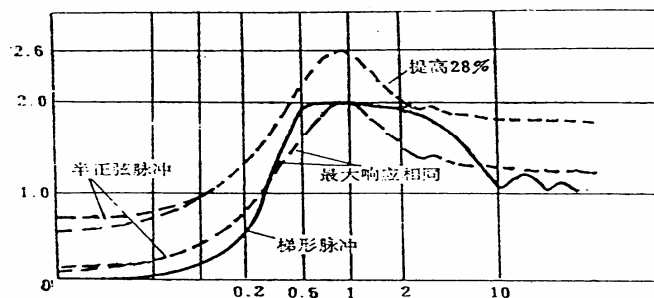


图 18-23 半正弦脉冲的冲击响应谱包络梯形击脉冲的冲击响应谱

18.10 将产品现场的冲击响应转换成标称脉冲进行模拟与考核

下图 18-24 卡车过障碍物时从车辆底板测得的三次冲击的冲击时间历程：(a 曲线)、(b 曲线)、(c 曲线)及相应三条冲击响应谱曲线。从图 18-24 中可以看出：三次冲击的冲击时间历程中峰值最高为 3.5g (b 曲线)，处理成冲击响应谱曲线后,最高响应达 20g。

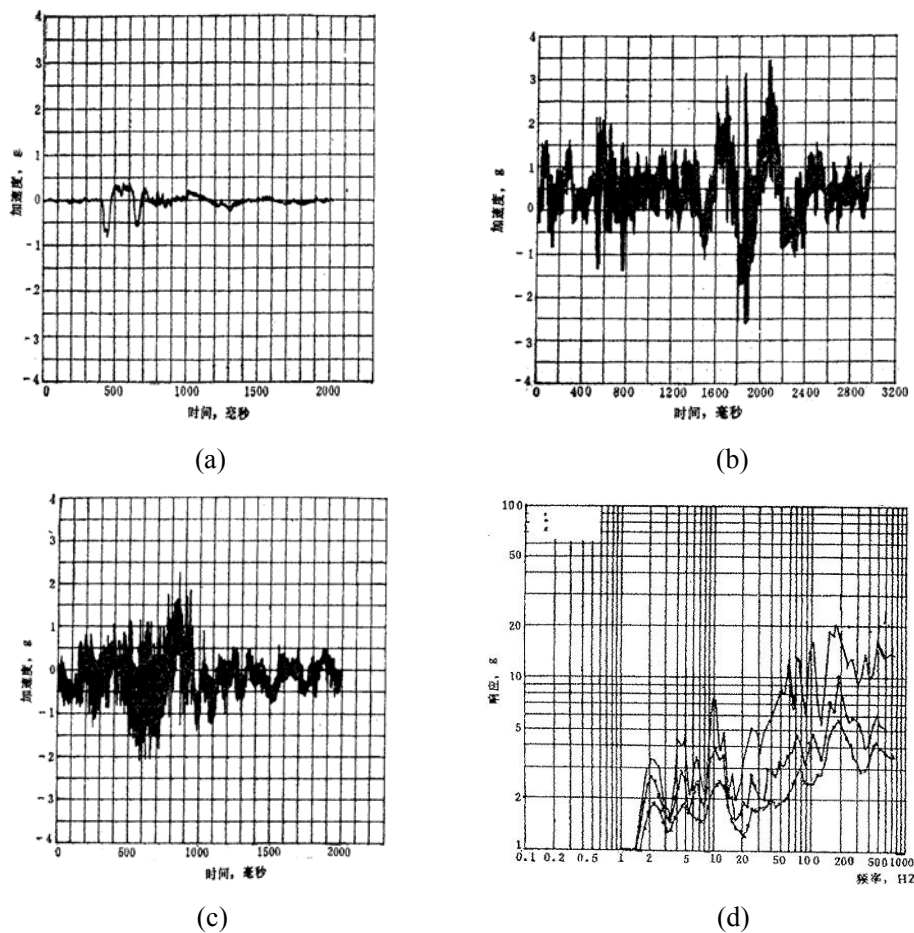


图 18-24 卡车过障碍物时从车辆底板测得的冲击时间历程：
(a)、(b)、(c) 及冲击响应谱(d)

将图 18-24(d)的冲击响应谱转换成由半正弦冲击脉冲产生，即用半正弦冲击脉冲的冲击响应谱包络图 18-24(d)的冲击响应谱，即图 18-25。从图 18-25 可见，用 $28 \div 1.78 = 15.7g$ 的半正弦脉冲就可完成 18-24(d)冲击对产品所能造成的损伤的考核。

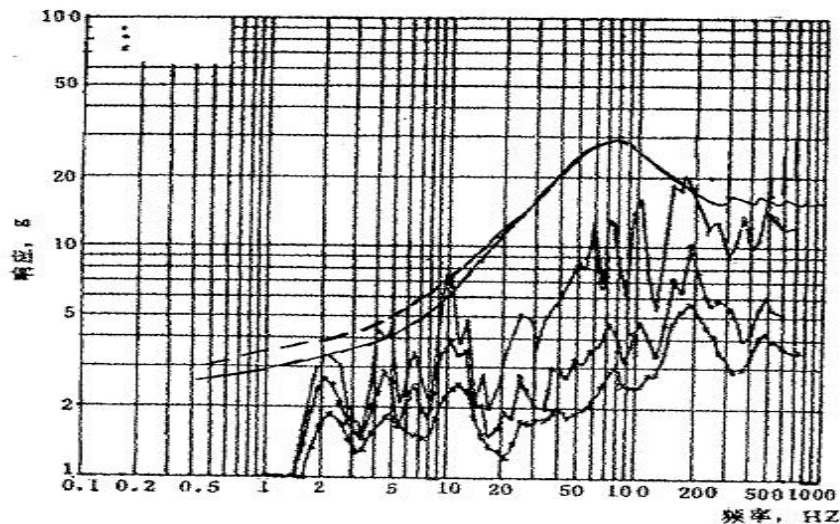


图 18-25 将现场冲击转换成半正弦进行试验考核

18.11 随机振动试验代替冲击试验

对一个从外场获得的高量级稳态随机振动的 ASD 数据，如果它所代表的时间历程超过了外场获得的冲击环境的时间历程，可以认为进行了随机振动试验也对冲击环境提供一个足够的试验考核，所以仅仅需要进行稳态随机振动试验就可以了。

以飞行装备功能冲击响应谱试验和地面装备功能冲击响应谱试验为例（见图 18-14 试验用冲击响应谱），如果对外场测量的稳态随机振动数据，计算其 ASD，并与图 18-26 中给出的等效于图 18-14 试验用冲击响应谱的随机振动试验输入用的 ASD 进行比较。如果在每个最大不超过 5 Hz 分析滤波带宽的频率上，外场测量测量的 ASD 超过 18-26 中的 ASD，那么，仅需对样品进行随机振动试验，即无需再进行冲击试验了。

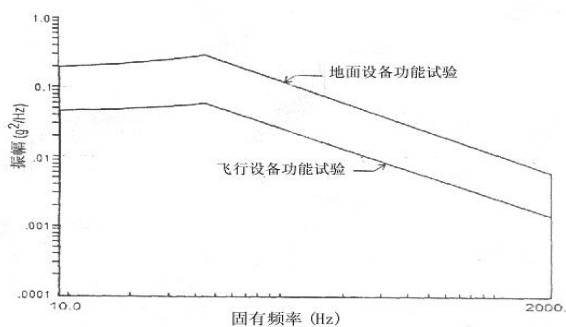


图 18-26 等效于图 18-14 试验用冲击响应谱的 ASD

18.11 冲击试验顺序

在正常情况下，冲击试验的顺序在环境试验的顺序应靠前，但应在振动试验之后。

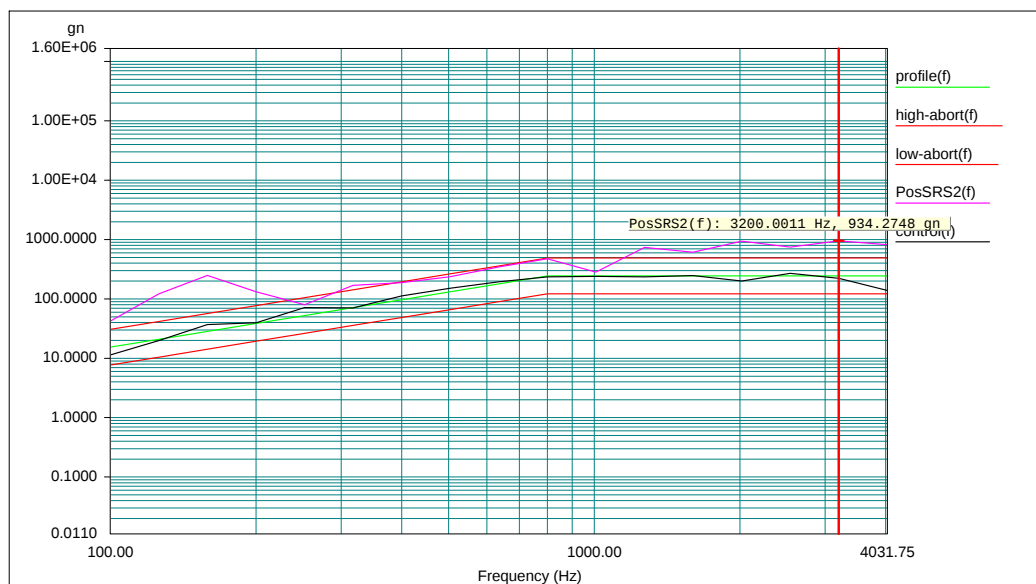
(1 如果认为冲击环境很严酷，在产品主要结构或功能不失效的条件下产品生存的几率较小，那么冲击试验应放在试验顺序的首位。以便在进行更多的相对不很严酷环境试验

之前，有机会首先改进产品设计以满足抗冲击性能要求，同时节省研制与试验费用。

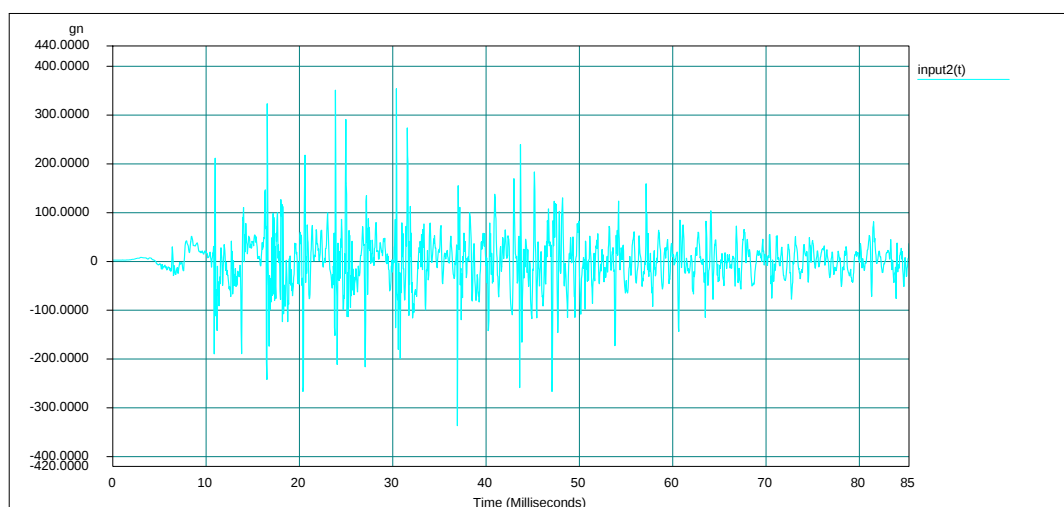
(2)如果认为冲击环境虽很严酷，但在产品主要结构或功能不失效的条件下产品生存的机率较大，那么就在振动试验和温度试验之后进行冲击试验，以暴露综合振动、温度和冲击环境下的失效。

(3)如果认为冲击试验量级与振动试验量级相比并不严重，那么冲击试验可以从试验项目中去掉。

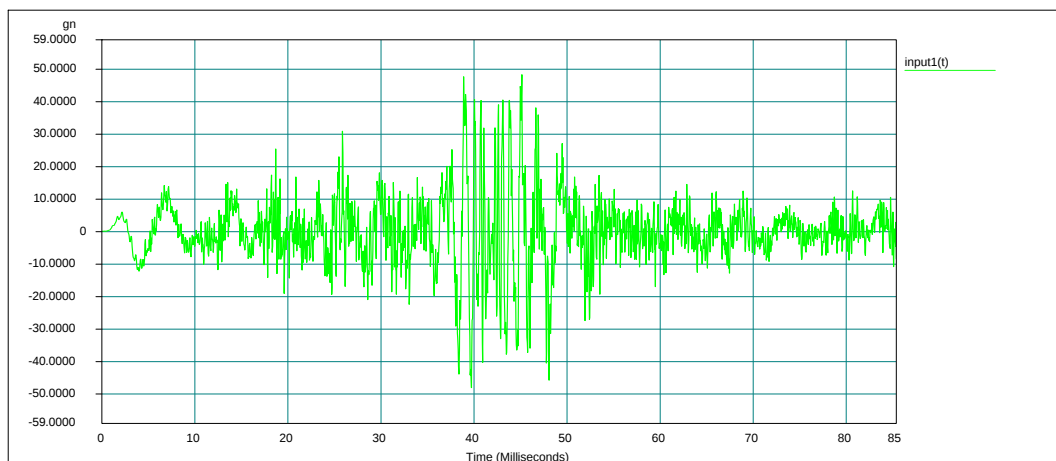
(4)在气候试验前进行冲击试验常常是有利的，只要这个顺序代表了实际使用条件。然而，试验经验也表明，对气候敏感的缺陷在施加冲击环境后更加清晰地显示出来。然而，内部或外部的热应力会永久地减弱产品对振动和冲击的抵抗力。如果冲击试验在气候试验之前进行，这些缺陷就不能检测到。



18-21 (b) 试验施加的冲击响应谱曲线及响应曲线



18-21 (c) 试验施加的冲击时域信号



18-21 (d) 响应的冲击时域信号

5 夹具的设计与制造

5.1 引言

振动和冲击试验夹具设计，有时被称为不正规技术。当人们看到一个有经验的夹具设计师不经任何计算而设计出夹具，就加强了这种想法。如果某人要按分振动教材书去设计，他就会立即感到，诸如刚度矩阵也都用不上。于是这种想法就更进一步加深了。一些夹具设计者，只计算一些简支梁的振型，却很少去计算整个夹具的响应，只有及少数设计师能够恰如其份地运用逻辑程序去阐述并成功地设计夹具。许多评论者认为，对一个夹具不可能作出满意的分析。所以一个成功的设计，部分靠运气，部分凭经验。

对夹具各个部分作出合理的逐步分析后，就能够完成夹具的设计。夹具振动的误差，不会超过 10%或 20%，这样的误差通常是允许的。精度提得越高，需要花费的时间和努力就越大。

在机械工程方面有一定学位的人，并不一定设计出好夹具；而许多没有学位的人反到设计出优秀的夹具。对于夹具设计者，有了机械制造与电子学的基础，加上工程经验，特别是加工的经验。其次单位内外的制造的能力,就能制造出一个好的夹具。

5.2 夹具的功用

试验样品的安装有二种方法，一种是直接安装在振动台台面上(即动圈上)，另一种是通过过渡装置安装在振动台的台面（即动圈）上，这种过渡装置在振动和冲击试验中将其称为夹具。可见夹具的功用，就是将振动台（或冲击机）的振动和冲击能量通过机械连接不失真、不放大、一比一的传递传给试件，从而保证试验样品经受到所规定的试验应力，当然这是理想状态。图 1 给出的电

一机械方块图，表示振动试验系统各部分的关系：实线表示电能传递路线，虚线表示机械能传递路线。

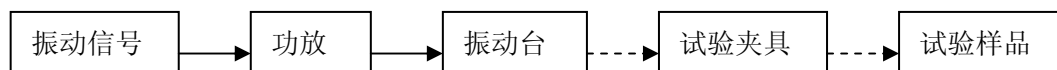


图 2-1

假设功率放大器对振动信号，在功率放大过程中，信号不失真，放大器的输出波形是输入波形的精确再现。但是，所有放大器都会引入一定量的谐波失真，当试验在振动台、夹具和试件的高 Q 共振频率的整数倍时进行时，谐波失真会特别严重。

同样，假设振动台动圈将驱动线圈（力从这里产生）的振动能量，不失真地传递到台面。夹具的功用与振动台动圈相类似，它将台面的运动不失真地传递到试件。

为了将振动台的能量不放大不失真通过夹具传递给试验样品，动圈和夹具之间要形成刚性台体结构，夹具可用镁合金或用铝合金铸造或焊接而成，刚度将随重量减小而加大。振动台动圈在有试件或没有试件的情况下都有共振，有时 Q 值（放大因子）可达 100。共振频率取决于动圈尺寸的大小。在空载时，动圈可以从大型振动台的 1300Hz 到小型振动台 5000Hz（或更高些）之间的频段上发生共振。跟振动台设计者一样，夹具也必须设计成重量最小而刚性又最大，并在试验频率范围内不要产生结构共振。但和振动台设计者不同，也许还加上时间、金钱等附加限制。不可能去制造一个试验性夹具，然后花几周的时间完全测出它的动特性，进行改进，观察响应，逐步研制出用于生产的最优定型结构。要想一次设计成功，（至少要设计几十个夹具，时间约一年）。则每年至少设计多于一打的夹具才行。

5.3 夹具基本要求

上面已说了振动、冲击试验夹具的功用就是将振动台（或冲击机）产生的机械能传递给试件。夹具在总体设计方面所遇到的困难是必须设计出重量最小、刚性最大、在试验频率范围内不会发生结构共振的夹具。夹具设计往往取决于工程经验，

夹具设计一般比较费时、费力，不仅要考虑夹具本身的特性，而且要尽量减少夹具与试件的相互影响。夹具设计应包括分析和预计试件的最低阶振型。

夹具设计的理论计算主要包括刚度、质量和固有频率三个基本参数。刚度包括刚体平移、刚体旋转及刚体弯曲；阻尼并不明显地改变固有频率，仅改变振动幅值。影响固有频率的二个要素为质量和刚性。对于复杂夹具的固有频率，

Dunkerley 方程提供了一种方法，即通过结合复合结构元件中的非偶合型固有频率来估计系统的固有频率。夹具设计时必须进行的几个最基本设计如下。

(1) 夹具的固有频率应满足试验的频率范围

许多产品的可靠性与环境试验要求的试验频率范围一般为 10~2000Hz，所有试验必须使用电磁振动台。电磁振动台是目前最先进最常用的振动台，其最低频率一般为 5~10Hz，最高频率可达 3000~4000Hz 以上。为了满足 10~2000Hz 试验频率范围，在此频率范围，夹具的频响特性要平坦，夹具设计和计算（或测定）时，其一阶频率应高于最高试验频率。这对于小型、简单夹具是易做到的，但对大型复杂夹具则很困难甚至是不可能的。即使这样，设计计算（或测定）夹具的一阶固有频率也应高于试件的一阶固有频率，以避免发生夹具与试件的共振耦合。在确定试件的固有频率时，可以把试件划分为梁、板等元件，计算各个元件的固有频率，然后用 Dunkerley 方程计算试件的固有频率。

(2) 对夹具重量（振动台额定推力）的验算

对夹具重量（振动台额定推力）的验算，主要考虑振动台的承载重量 W 和试验加速度 a 。当正弦振动试验的最大加速度为 a 时，振动台的正弦推力 F 应大于 $W \cdot a$ ；当随机振动试验的总均方根加速度值已知为 a_{rms} 时，振动台的随机推力 F 应大于 $(W_1+W_2+W_3) \cdot a_{rms}$ 。式中： W_1 ：试验样品重量， W_2 ：夹具重量， W_3 ：振动台动圈重量。设计用来支撑试件的夹具，试件的尺寸和形状是必不可少的，因为它们决定夹具的尺寸和形状。你还必须试件的重量和重心，至少也要估算出重心的位置，试件和夹具的合成重心尽可能精确地落在振动台的中心线上。

温度对夹具的性能也是有影响的，当一夹具要用于温度振动试验时，就要注意这一点，高温可使金属产生塑性屈服，低温可使材料冷脆。

一个好的夹具至少应满足下列要求：

(1) 在整个试验频率范围内，夹具的频响特性要平坦，夹具的第一阶固有频率应高于最高试验频率，还应避免发生夹具与产品的共振耦合。

(2) 夹具与产品连接面上的各连接点的响应要尽量一致，以确保试验时激励输入的均匀性。

(3) 夹具的刚度质量比要足够大。

(4) 夹具的阻尼要大，夹具共振时（第一阶固有频率），其品质（放大）因数 Q 不应大于 4。

(5) 夹具的质量最好是试件的 2~4 倍。通常在估算振动台需要的推力的时，用此比值就行。

(6) 夹具横向运动（指垂直于激振方向）要尽量小。

(7) 波形失真小, 在夹具第一阶固有频率之前, 波形失真度不大于 25%, 之后不大于 60%。

(8) 各连接点的运动尽量一致

夹具各连接点的运动都一致是困难的, 在某些频率下, 出现相位和振幅的差别, 其差别有时最高到 50: 1, 这从台面上几个加速度计的输出中就能看到。一个好的设计能够部分地使差别减至最小, 而且能够在实验规范要求的频率范围内, 使得各加速度计之间的差别达到容许限度, 很大程度上决定于夹具和振动台的尺寸。无论你的设计和制造出的夹具多么好, 如果合力超出振动台规定的倾覆力矩, 运动将不再是线性的, 而且各加速度计输出差别很大。

5.4 夹具的基本形式

夹具的种类繁多, 差别很大, 从专门用途以及设计上的差别可分为:

(1) 平板型夹具

平板型夹具的作用是把试件与振动台面连接起来, 若没有这样的板, 要使试件与振动台面直接连接进行振动试验或冲击试验, 就很少有这种可能性。此外这种板减少了对振动台面上衬套的磨损以及衬套从台面上脱出的危险。

平板型夹具绝大部分是价值不大的消耗品, 如简单的平板。但有些需精心制作。如需长期的、大量的做试验用, 这些板就应当精心设计。实际的例子就是, 把大量零件放到一块大型转接板上在大振动台上做试验, 这要比只是单个或有限个零件放在小振动台上做试验经济得多。一般地讲, 过度板的尺寸是任意的, 直到和振动台面的直径一般大 (有时允许稍微超出一些)。厚度可以从 2.5cm 到 15cm 任选。埋螺钉头的孔一般是用平底打孔钻钻成。并用钢制平垫圈 (机加工并淬火) 以保护肩部。

(2) 立方型夹具

立方体夹具主要用于小型零构件的振动冲击试验。可以直接固定振动台上。也可以由过度板来固定。当装在顶面上的试件接受垂直方向的振动冲击时, 其它四个平面 (在四周上) 都能接受到平行方向的振动冲击。四周上的任一快板均能转 90^0 (在基平面内旋转) 用于经受平行于基平面的二个方向的振动或四个方向冲击 (冲击有正向冲击和反向冲击之分, 故比振动多了二个方向)。

立方体上有螺钉衬套, 用螺钉连接板 (或者与试件直接相连)。夹具上还必需有连接气、液、或电器的安装孔。

(3) 过度架型夹具

过度架型夹具主要用于整机产品的试验, 这种夹具要根据试验样品的形状来设计。所以不同形状的样品, 其夹具的形状也不相同。过度架型夹具的形状、刚度和强度要尽量接近样品在实际使用中的情况。

(4) L 形夹具

L 形夹具的各部分可用螺接, 亦可用粘结或焊接结合起来, 或者用整块料机械加工而成。

(5) T 形夹具

T 形夹具除了垂直平板装在中心位置外, 其他方面和 L 形夹具相类似。试验件可以同时固定在垂直平板的两面, 只要夹具比试件重, 就很容易做到使试件/夹具的组合重心通过振动台的轴线。除上述 5 种形式外, 还有各种形式的夹具等。

5.5 夹具的材料和制作方法

5.5.1 制作的夹具材料

在制作夹具的过程中, 通常是首先选择制作方法, 然后是选择材料。就材料而言, 材料的强度和疲劳特性在夹具设计中很少需要考虑。因为夹具高频特性所要求的刚性使得夹具非常结实。很少因强度不足而损坏的。

由于重量常常是夹具最关键的参数, 所以铝和镁是最常用的材料。对同一尺寸大小的金属而言, 铝(密度 0.1 磅/英寸³)比镁(0.065 磅/英寸³)重 1/3, 而钢(0.3 磅/英寸³)比镁重四倍。某些铝镁合金的阻尼特性比钢好, 加工也便宜。控制固有频率的因素是 E/P , 其中 E 是杨氏模数(磅/英寸³), P 是密度(磅/英寸³)。对于大多数金属来说 E/P 比值约为 10^8 。因此, 为一些特殊设计精选材料并不会明显改变其频率特性。

夹具设计者要考虑材料的价格。一次购买大量的材料虽然贮存起来可能困难, 但能节省资金。只要付给少量的附加费用, 供应者常常能够粗略地把板材切割成最适用的尺寸。设计人员经常要帮助他们的采购人员去寻找最好的供应者。

镁在机械加工时, 经常要提醒有关着火的危险性。主要危险是精刨或镁屑集中处, 如有一个小颗粒被点着就会导致全部爆发。加强厂房管理就可以避免这种危险。

5.5.2 用整块原材料机械加工制造夹具

用一块整块材料经机械加工来制作夹具是经常用的方法, 这是最快最省的方法。对于小试件来讲, 尤为正确。镁材, 机械加工最快最容易。全部金属切削工作都能以最高的机械加工速度进行。磨、镗、钻和插等都能以任何其他金属加工难以达到的速度完成。镁的切削速度比铝约快 20%, 是钢的三倍。

当夹具是用螺钉将各部分连成一体时, 会出现配合和预应力问题。整体机械加工就避免了上述问题。当然, 试件装到某一夹具上也需要用一些连接件。

5.5.3. 焊接夹具

在振动试验的早期, 大约 20 世纪 40 年代-50 年代, 曾广泛使用螺接家具。

但其最明显的缺点是不能防止夹具各部分的相对运动，造成波形有毛刺畸形，这样铸造夹具就普遍被采用了。由于铸造夹具成本高，生产周期长，因此导致目前又普遍使用焊接夹具。许多试验计划又不允许将机动时间用于铸造夹具，正如我们见要看到的另外几种方法，正在受到欢迎。因为它们更节省费用和时间。在机加工中发现一个有趣的对比：现在 80%是焊接的，20%铸造的。

焊接夹具很早就使用过，但并不十分成功。焊件时常破坏，许多焊件在振动载荷下断裂。但焊接夹具比铸造夹具省时间（是铸造时间的 1/7），费用节省，是铸造的 1/3，随当今焊接技术的不断提高，焊接夹具已用得愈来愈多。

5.5.4 螺接夹具

螺接夹具加工简单，但想要获得很好的性能，无论在设计方面还是在制作方面都需要作相当大的努力。因此，通常是首先考虑用一块整材经机械加工和焊接夹具。不管怎么说，振动试验新手总想至少来一次螺接夹具的尝试。螺接是连接各部件的常用合理方法。但它不是指夹具各部分。在某些情况下（尤其是在试件的四周安装夹具）螺接是唯一的解决的办法。关于夹具和激振器螺接的好多事项，也适用于夹具中几个部件螺接在一起的情况以及把试件螺接到夹具上的情况。

在螺接夹具中有二个主要要求：

（1）配合面要加工到很高的配合精度。

（2）螺栓的预紧力比计算的最大分离力至少要大 10%。如果没有足够的预紧力，部件会脱开相互撞击。因为这个问题很重要，如果忽视了，在正弦和随机试验中会带来一些麻烦。

当部件互相脱开又碰撞在一起时就会引起撞击。（这就是在振动时间历程图上见到的“毛刺”）。这种撞击常常会造成超过试验规定的应力和频率范围。从而导致试件不应有的（而且不许可的）损坏，同时也造成试验控制很困难，例如试验中断。

为了使装配好的零件总是结合在一起，必须大量使用高强度螺钉，并拧紧之。螺栓间距一定要小，否则螺栓间的跨度会发生共振。用大型夹具并要求试验到 2000Hz，则螺栓间距不得超过 75mm。用螺栓压住薄的聚脂簿条或表面敷有涂层的布条有助于防止局部运动。

由于铝材和镁材柔软，螺栓应用粗制而不是精制螺纹。如果夹具要多次拆卸，螺纹应加钢制螺纹衬套。螺栓头应紧压在淬过火的钢制平垫圈上，以保护螺栓头下面的肩部。

要注意防止依靠螺栓受剪传递振动力的危险性，除了小部件或在低加速度情况下，一般不要单独依靠螺栓传递这种力，如可能的话，用某些方法增加各

部件之间的摩擦力。

5.5.5 铸造夹具

在要求有曲面的地方（特别是弧度不是常数）应考虑用铸造夹具。任何奇形怪状的试件它都能适应，能满足多方面设计要求，如要求一定的厚度的截面，变剖面，很多角撑板复杂截面等。铸造夹具的设计指标是频率/重量之比最大。

用铸造的最大理由就是铸造合金的阻尼相当高。但是，这种合金的加工性能或焊接性能都不好。例如，某些铸铁比钢的阻尼高。对于夹具来说，已知最好的合金是 KIA 镁（含 0.7% 铅），建议使用 AZ₉₁T4（含 1% 的锌）、AZ₉₂T4（含 2% 的锌）。AZ₉₁T4C 可以铸造后焊接。阻尼能降低输出输入比，减少共振的幅度，在较高的试验频段上传递特性随之迅速下降。

对阻尼已做过许多研究。虽然不能全部了解，但已证明：具有高阻尼的合金都具有下列共同的因素：

- （1）合金含量低，（纯镁比合金要好，但其他性能不好）；
- （2）相当粗糙的粒度（砂铸比压铸号）；
- （3）屈服强度相当低（容易取出嵌件）；
- （4）在铸造状态性能最好（一经加工，阻尼要损失）。

5.5.6 粘接夹具

粘接很小的夹具比焊接夹具要快而且便宜得多（对于大型夹具最好用焊接，但有一个温度限制问题）况且，这个工艺过程通常在实验室本身的能力范围内就能完成，只要粗略的草图作指导，实验室技术人员就能完成整个任务。

用金属胶代替紧固件必须加高温，用某些环氧树脂就能完成紧固工作。在环氧树脂固化过程中，有时用螺栓而不用夹具或卡具来固定试验夹具各部分的相对位置。

5.5.7 叠层夹具

叠层胶接技术可用于制造大型的，重量有轻的夹具。大家都知道胶合板夹具已经很成功地用到试验上了，所覆盖的频率范围最高可到 55Hz。

尺寸大约 450mm×450mm×450mm 的夹具，可连一个 40Kg 的电子设备到振动台上。正因如此，当接近较高的试验频率，如 2000 Hz 时，夹具有严重的共振，而这种夹具可以设计得相当轻而且阻尼大，所以对共振也就不是什么大的难题。

5.5.8 环氧树脂成形夹具

用环氧树脂（可能还有其他更好的材料）能很方便地制造出拚凑式曲面板。相比之下，这种方法既节约有省工时。亦有用环氧树脂按试件原样成功地塑造成夹具，当然试件要用脱模剂，以免环氧树脂同试件粘连。在环氧树脂固化之后脱模，就形成了与试件完全相配的夹具。为固定试件，嵌入钢制螺纹螺套，

为便于将夹具螺接到振动台上，钻孔稍大些。较普遍的方法是，用环氧树脂粘到一块转接板上。

5.5.9 .灌腊（封装）夹具

对于很小的零件，有一个有用的技术，就是把它装入某种材料中，而这种材料在完成振动、冲击或离心试验以后能够容易的去掉，石腊就是这样一种材料。在试验以后，只要把夹具放入烘箱内加温（50～70℃）直到石腊能够倒出来为止。这样的夹具还可节省试验费用。

5.6 与台面的螺接

试件与夹具之间、夹具各部分之间及夹具和振动台之间大多采用螺栓连接。夹具一振动台螺连时，螺栓承载的最大载荷为：

$$F = (m_1 + m_2 + m_3) \times a$$

其中：a：是正弦或随机振动的峰值，单位为 g。

F：螺栓承载的最大载荷

对每一螺钉，要将 F 除以螺钉数，得到每个螺钉所承受的最大载荷，再除以螺钉面积，就得到拉伸应力。

m_1 ：夹具重量

m_2 ：样品重量+动圈重量

m_3 ：动圈重量

为了避免台面与夹具分离以及螺钉疲劳破坏，每个螺钉至少要能承受这么大的应力值。

试验人员使用用力矩扳手拧紧螺栓，扭矩至少拧到表额定扭矩值的 3/4，因为一旦超过了“屈服”力，随着螺栓的伸长，螺栓的拧紧程度增加甚微。如果比“屈服力”大得多，螺栓就要剪断或拉断。

5.7 夹具的动态检测

为了保证振动和冲击试验的正确性，夹具在使用前还应进行动态检测，以检查其主要动态特性，如固有频率、传递特性、夹具与试件连接面上各点响应的均匀性、横向运动、波形失真度等是否符合要求，以确定是否还需采取技术措施进行补救。如果对夹具的动态品质不了解，则当试件在一定试验频率下不能正常工作时，就不易判明是夹具问题还是试件问题。因为夹具设计与制造得不好，就有可能误将合格的试件试验成不合格品，或将不合格试件试验成合格品。

进行夹具的动态测定能够揭露夹具的缺点，提出改进的方法。夹具修改后再测定，就可以知道其特性的变化，这对设计师而言，也是积累经验的最好办法。夹具动态测定的步骤简述如下。

- (1) 将夹具用螺栓紧固动台的台面上;
 - (2) 加速度传感器安装在振动台台面中心 (也可用各固定的多点控制的平均值), 进行闭环控制, 设其激振方向加速度为 a_{oz} ;
 - (3) 在紧靠夹具与试件(产品)的连接孔附近,选择几个响应测点,在每个响应测点处安装一个三方向加速度传感器,通过开环分别测量激振方向响应加速度 a_{iz} 及横向响应振动加速度 a_{ix} 和 a_{iy} ;
 - (4) 按试件振动试验频率范围进行正弦扫频试验(也可进行随机试验),记录控制点和各响应点的加速度随频率变化曲线,并用示波器观察其波形,失真仪测量波形失真度;
 - (5) 求出 a_{iz}/a_{oz} 随频率变化曲线,计算出传递率,用以检查所设计夹具在激振方向的传递特性、一阶固有频率共振时的品质因数“Q”和夹具连接面响应的均匀性;
 - (7) 求出横向振动与激振方向加速度的比 ($\sqrt{a_{ix}^2 + a_{iy}^2} / a_{oz}$), 以此值检查夹具横向运动大小。
- 在夹具测定时,一定要设法做到使频率高到能够确定出真实的共振振型,以免混淆非共振频率时出现的波形高峰。

第 17 章 声振试验

17.1 试验目的、影响机理、失效模式

声振试验又称噪声试验、音频噪声试验、诱发噪声试验等。它是 60 年代末随着航空航天技术的飞跃发展而发展起来的一个新型的尚未完全成熟和完善的环境试验项目。

人类能听到的声音的频率范围在 20Hz~20000 Hz, 声振试验的频率范围通常在 63 Hz~8000Hz (或 10000 Hz, 随规范和标准中的不同要求而不同), 频率超过这个范围的压力震荡称为超声波或超声。这些频率是人所听不到的, 但是在高的声压级下他们能产生某些生物影响。

声振试验的目的是确定在强声场内工作、运输和储存的产品对强声场的适应性能力。

强声场主要出现在各种航空航天飞行器上,例如喷气噪声、旋转噪声(螺旋桨或旋叶)、附面层压脉动噪声等。另外,车辆及动力装置和其它声源也可能产生强声场,例如泵和发电机组等大型机械内部或附近。

在声场内,声压的起伏直接作用在产品上。噪声所激起的振动类似于机械传递所产生的振动,不同的是机械传递的振动可以被减震器有效的隔离,但噪声不能被隔离。因此机械传递振动的影响可以忽略,而噪声对产品的影响应予充分考虑。

噪声对产品的破坏主要是对结构和工作性能的破坏。对结构的破坏主要是使产品的结构产生疲劳损伤,最后导致破坏。这种破坏通常是首先使产品出现累积损伤,然后出现裂

纹,继而裂纹扩大,最后断裂。对工作性能的破坏主要性能失调、工作失灵,产生故障等。噪声对产品的具体影响有:微电子器件的引线故障、导线磨损、印刷电路板破裂、波道管与速调管失调、失灵或损坏、光电元件产生振动、压电元件产生异常压电效应等。

对振动敏感的产品通常对噪声也是敏感的,然而正弦或随机振动试验不能代替声振试验,因为正弦或随机振动试验受振动台频率限制、受试验设备和夹具的振动衰减、受减振器的影响等。很可能会漏了一些高频元器件的高频谐振和响应。

通常在宽带随机噪声环境的总声压级达 130dB,即 $\geq 130\text{dB}$ 时,或每赫带声压级 $\geq 100\text{dB}$ 噪声场合工作的产品才要求进行声振试验。因为产品的表面或内部所承受到的声压 $\geq 130\text{dB}$ 时,经过一段时间后会使得结构产生疲劳。可见,从某种意义上讲,声振试验可以看作是对振动、冲击试验的补充。因为振动受到高频(一般最高为 2000Hz,而声振要到 11200Hz)的限制和受夹具、减震器、结构传递的影响。

17.2 试验条件及其选择

与其它振动试验一样,如果有产品安装平台的实测数据,就应用实测数据,如果没有或货架产品就用规范或标准中的数据。

17.2.1 试验条件

声振试验的试验条件主要是指总声压级、声压谱(频率范围)、持续时间三个参数。声压级是指声音在任何给定点上的振幅,通常用 SPL 表示,其物理单位为 dB。在一定频率范围内的声压级称总声压级,总声压级是以 $2 \times 10^{-5}\text{N/m}^2$ 的基础声压为基准压力来计算的。当描述声音时,仅测量总声压级是不够的。还必须对声音加以分析,以确定声音的能量在频率范围内的分布,即声压谱。

(1) 国标和 IEC 标准中的要求

声振试验的总声压级在 130dB~165dB 范围内,其中:

130dB——通常用来试验不靠近发动机喷口的运输机内部设备舱内的产品。

140dB——通常用来试验靠近发动机喷口的运输机内部设备舱内的产品,以及高性能军用飞机离喷口很远的内部设备舱内的产品。

150dB——通常用来试验靠近跑道工作的产品或发动机车台内工作的产品,以及军用飞机靠喷口的内部设备舱内的产品。

160dB——通常用来试验靠近飞机噪声源附近的产品,以及靠近炮口附近的产品。

165dB——通常用来试验在火箭的地面发射区中工作的产品,以及火箭助推器和发动机隔舱中工作的产品。

声振试验的时间一般是根据产品的工作场所和试验的目的来确定的。对工作在火箭、导弹上的产品,一般为 8~15 分钟(最长不超过 15 分钟)。通常是根据火箭和导弹的飞行时间再乘以一个安全系数来确定具体试验时间。

对于机载产品,在其工作寿命期间,将受到来自各种声源的不同噪声环境的作用。最严重的噪声发生的时间很短(例如起飞、加力飞行、特技飞行等),占产品寿命的一小部分,大部分时间是处在较低幅值的声压作用下。而试验室所采用的试验条件(严酷等级)都是模拟最严重的情况,所以试验时间都取得比较短,通常对机载产品的功能试验一般为 30 分钟(最长不超过 40 分钟)。对机载设备的声耐久试验,一般为 5~10 小时。为了缩短试验时间,对声耐久试验允许用加速方法进行。

(2) 军标中的要求

军标中的要求见下表 17-1

表 17-1 声振试验量级

分类	推荐的试验总声压级 (dB)	设备应用场所	飞行器类型	设备位置	推荐的试验时间 (mm)
A	165	地面	火箭	发生器	8
B	150	地面	飞机	靠近机场跑道或喷气发动机车台	30
C	150	地面	飞机	靠近声源并由隔板隔开	30
D	160	机载	飞机	靠近声源或在飞机的噪声锥内	30
E	160	机载	飞机	除助推器或发动机舱外的大多数位置	8
F	165	箭载	火箭	助推器或发动机舱	8
G	140	机载	飞机	大多数位置	30
H	根据样品计算	机载	飞机	外桂	耐久最小 1h
I	根据样品计算	机载	飞机	暴露在气流中的空腔附近或内部	耐久最小 1h

17.2.1 倍频程频带谱型

在进行声振试验时，所产生的总声压级应与试验所要求的声压谱相一致。图 17-1 给出了目前国际上一些主要环境试验标准中声振试验所用的倍频程频带频谱。

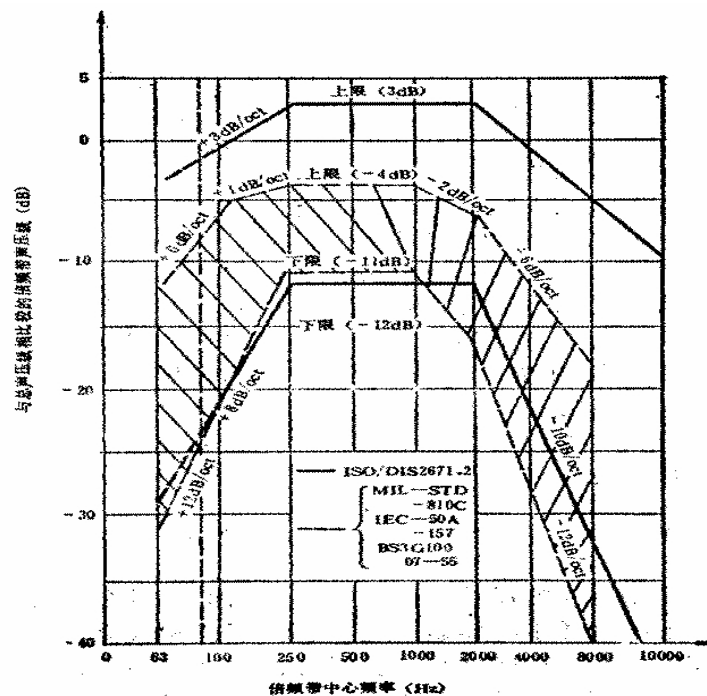


图 17-1 声振试验倍频程频带频谱

17.3 声振试验设备

模拟现场噪声及其影响的设备有多种,且各有其特点,无论何种设备均由声场(试验室)、产生声场(声源)的设备、检测声场的仪器三大部分组成。下面以用得较多的混响室为例来说明对声振试验设备的要求。

17.3.1 声场(试验室)

(1) 混响室

试验室的形状和结构应能形成密封的传声场。为了能产生均匀的混响声场,试验室的壁面应尽量避免互相平行,最好采用图 17-2 的示的不规则五角形。

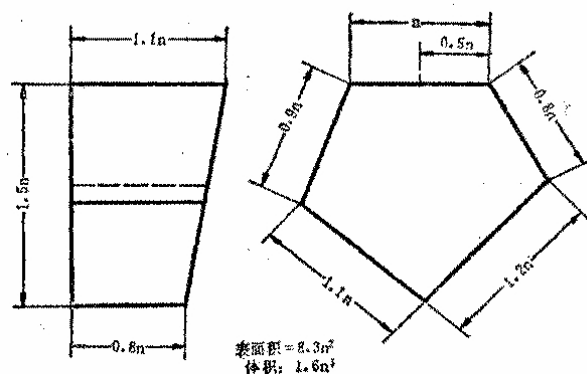


图 17-2 混响室的形状

为了提高混响室的效果,试验室的容积至少应为样品体积的 10 倍。壁面材料应具有最小的吸音系数,以节省声源的功率。试验室还应设计成能保护工作人员免受噪声的影响。

(2) 行波试验管

它是一个管状的试验装置,在管的一端加声载(理想的声载是平面波)。声波在管内以平面的形式向前传播。声波像水波在水面上传播那样扫过试验样品表面,另一端是出口。平面波的传播有时也会受试验样品的影响引起声场的变化。由于声源局限在管内,因此可以得到高的声压级。行波管试验技术用来局部强声源。它还适用于直接受到火箭或喷气发动机局部声源作用的各种类型飞行器的外部设备。

(3) 自由声场或半自由声场

自由声场或半自由声场是一个没有声能反射或反射不大的声场。通常利用一块空旷的场地作为试验场地。它模拟的是声压级较低的行波声场,并往往需要用隔板来产生所需要的声压分布。由于它简单、场地大,往往用来做试验声压级不高、谱形要求不严的大尺寸的样品。

(4) 其它

对声场,除上面所介绍的混响室、行波管和自由声场或半自由声场外,在无设备的情况下,根据样品实际所要求的噪声环境和试验目的,还可用火箭或喷气发动机地面试车时后面产生的噪声场(类似于半自由声场)来进行声振试验。其条件是只要它能达到声振试验条件所需要的均匀度、声谱和总声压级。由于该试验环境难以控制,因此它的使用又以定的局限性。

17.3.2 产生声场(声源)的设备

产生声场的设备可采用气笛、空气喷管或电动扬声器,而以电动场声器最适用。无论采用何种声源,它对样品所施加的噪声应具有接近正态分布的随机能量。声源所产生的总声压级的均匀应在 $-2 \sim +4\text{dB}$ 范围内。声源的功率应能保证在所规定的频率范围内同时对样

品产生激励。另外，声源的通道相对于混响室壁的总面积要尽量小。

17.3.2 检测声场的仪器

在振试验中，必须对声压级、声压不均匀度、声谱形状等进行测量。测量时，采用装有微音器的测量仪表和指示仪表进行。检测仪表至少应具有比所规定的声压级高 10dB 的检测能力。当检测随机噪声时，测量系统应能给出声压的方均根值。测量声压谱时，声压级量值的测量大多数环境试验标准都规定用倍频程带中心频率和频带宽度来进行。测量使用的微音器应在随机影响范围内校准。测量系统的精度应符合精密声级计以及精密倍频程带宽滤波器的精度等级。这样得到的指示值就可直接和所规定的量值及其容差进行比较，而不需要进一步修正仪表误差。

17.4 样品的安装

声振试验的成败与样品的安装很有关系。样品在声场中的安装要求是：整个外表面都应暴露在声场中，样品的主要表面不应和试验箱的任何表面平行（在某些情况下允许非主要表面和试验室壁面平行，其中包括天花板与地板），因为壁面和样品的主要表面相平时，势必在壁面和样品的主要表面之间产生平行反射波，从而影响声场的混响效应和均匀度。如果样品的长短轴线相差很大，并且是使用单声源时，则样品的长轴线不应和声源的激励方向一致。应尽可能将样品安装在试验室中心，且靠近声源，以使声场对样品直接激励。样品在试验中应该用弹簧或软线（例如橡胶绳）悬挂起来。如果软悬挂与样品之间，或为了固定悬挂，需要一安装结构，则要小心使用，应保证不产生伪声和伪振动输入。整个悬挂系统加上样品后的共振频率应低于 25Hz，这样可防止试验时由于悬挂系统共振而造成的附加振动。如果样品有专用的安装点，悬挂系统应和这些专用安装点相连；如果样品没有专用安装点，悬挂系统和样品的连接应以不妨碍样品的自由运动和独立运动为原则。功能试验时所需的电缆、导管等的连接和安排，以及附加的约束和质量，应尽量模拟实际使用时的安装。

17.5 试验程序

与其它试验一样，声振试验的试验程序由预处理、初始检测、预调、试验、恢复、最后检测几步组成。下列各步有别于其它试验，应掌握好：

（1）预调

预调的目的主要是用来检查声压级和声谱容差。预调是在无样品（包括样品的悬挂结构）的情况下进行的。预调时检测传感器要安装在样品试验时将要占据的空间位置上。通常使用一个微音器来进行预调。如果有特殊要求，也可使用多个微音器来进行。

预调时，试验室应能产生所规定的总声压级值，并且与所要求的声谱形状一致（如图 17-2 所示）。测量系统应具有比 1 倍频程更好的分辨率，但可适当降低如图 17-2 所示的倍频程带宽声压级，以达到所需的总声压级值。

（2）试验

预调结束后，将样品按本章 17.4 的安装要求安装在试验场中，然后开始重新建立总声压级值。通常至少用三个微音器（最多不超过六个）来检测。微音器的位置根据试验的要求放置。多数环境试验标准采用的方法是将微音器放置在接近样品的每个不同的主要表面，并且离样品约 0.5 米处，或放置在样品主要表面和试验室壁面距离二分之一处，并且在二者中取小尺寸者。当试验室只有一个噪声注入点时，应有一个微音器放置在样品和噪声注入点最远的室壁之间。

在样品和检测微音器安装好后,就开始重新调整声压级,应使每个检测点上的压级的平均值在所规定的 -2dB — $+4\text{dB}$ 范围内,并且总声压级也在 -2dB — $+4\text{dB}$ 内。对大型样品,要达到总声压级的容差要求可能是困难的,此时容差允许放宽,例如为 $\pm 6\text{dB}$ 。

达到所规定的总声压级和容差要求后,将样品按功能试验和耐久试验的要求试验到规定的时间。

(3) 最后检测

对样品的外观、结构进行检查,例如检查样品有无松弛、裂纹,导线有无擦伤等。对样品施加电应力检查其功能是否正常,测量电性能是否符合要求。若样品的功能和电性能参数均在规定的范围内,则认为满足功能试验要求。耐久试验结束后,在规定的功能条件下,样品工作正常,电性能参数在极限范围内,而且无机械损伤等,则被认为满足了耐久试验条件。

17.6 试验分类

在有些标准(例如军标)根据试验目的的不同,将声振试验分为:

(1) 设计研究试验

设计研究试验是在设备研制过程中的试验,用来找出样品或飞行试验样品中动态特性和缺陷,为设计师提供信息,消除工艺方案中的错误和不足。该试验要模拟使用和飞行中最恶劣的环境,所对应的试验条件是最严酷的声环境的声压级。

(2) 鉴定试验

鉴定试验是用来试验样品是否满足合同规定要求的试验。应采用产品可能经受到的最恶劣的环境作为试验的基础。鉴定试验包含性能试验和耐久试验。性能试验是有效使用期内最严酷的环境试验;耐久试验是一种加速试验,它必须模拟产品累积效应时间。如一个样品既要进行性能试验又要进行耐久试验,应先做一半时间的性能试验,再做耐久试验,最后完成余下一半时间的性能试验。

(3) 飞行剖面试验

飞行剖面试验是模拟飞行状态的试验,要求在某声压级的试验时间与使用中相同声压级的作用时间一样,并按飞行时间历程来模拟。因此试验期间的声压级是随时间变化的。它不是一种加速试验,但也不是精确的真实的飞行时间历程再现。