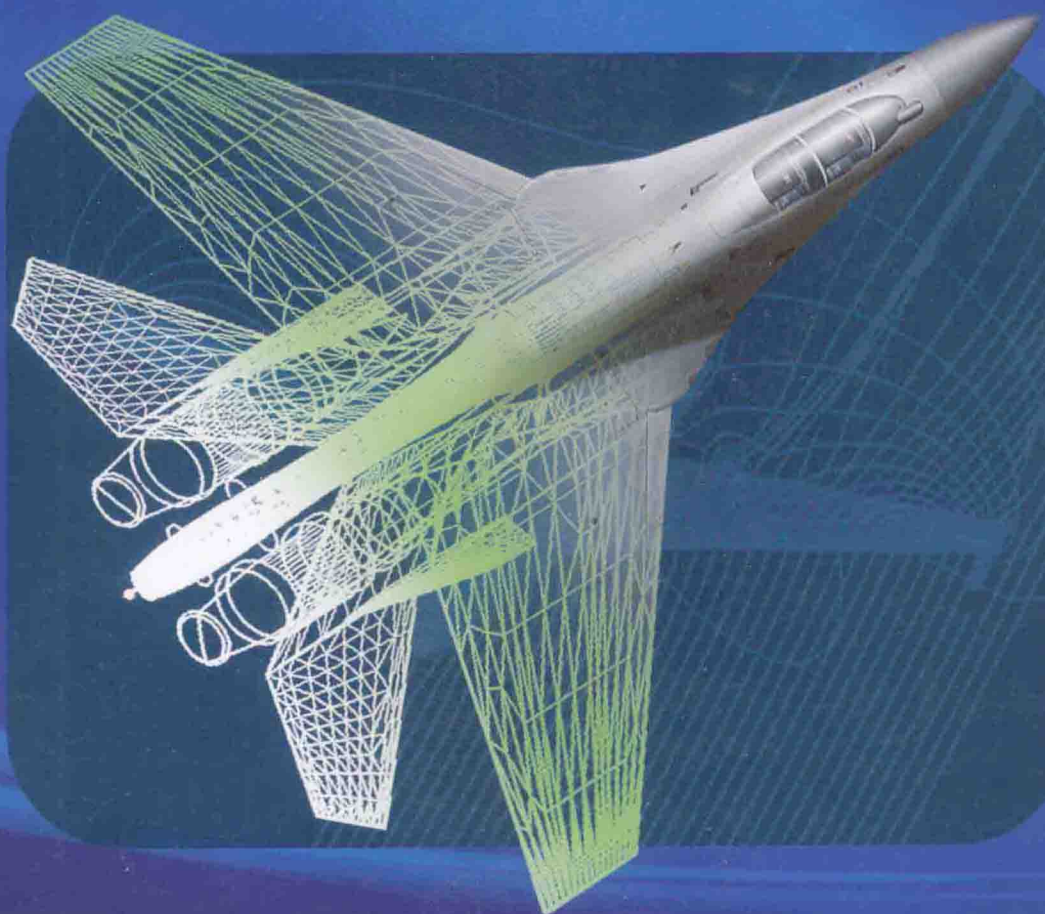


飞机结构振动设计与试验

Aircraft Structural Vibration Design and Testing

施荣明 编著



航空工业出版社

飞机结构振动设计与试验

施荣明 编著

航空工业出版社

内 容 提 要

本书内容包括：振源描述及振动标准和规范；振动环境测量、数据分析、数据归纳及标准制定；飞机振动故障实测及振动破坏机理；设备振动试验、设备安装的动强度设计要求、振动试验夹具的结构动力设计；动响应分析，振动疲劳分析，结构振动试验，结构动强度设计判据、准则和工作流程；结构动力学设计的工程要求。

本书所涉及到的各类振动问题对从事振动工作的有关设计、试验的人员都具有一定的参考价值。

图书在版编目 (C I P) 数据

飞机结构振动设计与试验 / 施荣明编著. -- 北京 :
航空工业出版社, 2014. 10

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0374 - 4

I. ①飞… II. ①施… III. ①飞机—结构振动—结构设计②飞机—结构振动—试验 IV. ①V215.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 235242 号

飞机结构振动设计与试验

Feiji Jiegou Zhendong Sheji yu Shiyān

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2014 年 10 月第 1 版

2014 年 10 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 21 插页: 2 字数: 520 千字

印数: 1—1500

定价: 86.00 元

前 言

本书是本人一辈子从事飞机结构振动工作的一个总结。

全书共分十七章，可以划分为以下六个部分。

第一部分为第一~第三章，振源描述及振动标准和规范。振源是指动载荷，是研究结构（设备）振动的输入条件，没有动载荷就谈不上动强度问题，但到目前为止，本书所提及的这些振源，还不能很好地从工程角度给予比较准确的描述，如何能精确地给出飞机结构的各类动载荷（振源引起的），应该是从事飞机结构振动的人们继续努力奋斗，从而去实现这个目标。

结构（设备）振动属于飞机结构强度领域中的动强度部分，因此，结构（设备）振动（动强度工作）的设计与试验应遵循有关的标准和规范。一般来说，设备振动应遵循振动标准，结构振动应遵循振动规范的有关规定。本书第二章介绍了国内外振动标准变化的情况，国外标准重点介绍了 MIL-STD-810D 和 MIL-STD-810F 中有关振动部分，国内标准重点介绍了 GJB 150.16 和 GJB 150.16A 振动试验方法。振动规范主要介绍了 GJB 67.8 和 GJB 67.8A 振动和航空声部分。

第二部分为第四~第七章，包括振动环境测量、数据分析、数据归纳及标准制定四个内容。该部分重点介绍了振动环境实测的有关内容，因为 GJB 150.16 和 GJB 150.16A 都反复强调设备振动环境条件的获得如有实测则按实测，在没有实测的情况下才选用标准给出的条件，所以振动环境实测是飞机结构（设备）振动工作的重要内容之一。该部分讲述了如何进行正确的振动环境测量、数据分析、数据归纳，以及标准制定方面的有关问题。这部分的内容是以 20 世纪七八十年代航空工业部振动环境标准技术组组织的 5 架飞机实测，12 个相关课题的研究而制定的 HB 5830 振动标准为背景而写的。

第三部分为第八、第九章，包括飞机振动故障实测及振动破坏机理两个内容。飞机振动故障实测中收集了歼 8 飞机 9 个典型的真实的振动故障案例，包括故障概况、故障分析、结论及改进措施。通过典型故障案例分析，可以从中总结出飞机振动故障的描述及排故方法。振动破坏机理只是做一个较粗浅的分析，对应振动功能试验的峰值破坏准则和振动耐久试验的疲劳破坏准则等。

第四部分为第十~第十二章，包括设备振动试验、设备安装的动强度设计要求、振动试验夹具的结构动力设计等三个内容。设备振动试验简述了设备振动试验的 6 种方法；设备安装的动强度设计要求主要针对设备安装支架的设计，一方面要有足够的动强度和刚度，另一方面设备安装支架要避免和局部振源（如飞机炮击振动）等发生共振，以免由于共振使设备安装支架发生振动疲劳破坏；振动试验夹具的结构动力学设计，主要解决实验室模拟环境试验时，设备安装夹具要和设备在载机上真实的设备安装支架其振动传递特性（机载阻抗）要保持一致的问题，这样，才能使实验室的模拟试验时设

备感受的振动和载机条件下的设备振动保持一致,换言之,此状态下的实验室模拟试验才能和真实载机下的真实状态相一致,以保证模拟试验的有效性。这个问题也是 GJB 150.16A 中强调的一个重要问题(见 GJB 150.16A 的 3.3.2 条平台/装备的耦合作用)。

第五部分为第十三~第十六章,包括动响应分析,振动疲劳分析,结构振动试验,结构动强度设计判据、准则和工作流程四个内容。这部分主要叙述结构振动的设计和试验工作,响应分析是结构动强度的主要分析工作手段,结构振动就是研究在动载荷作用下结构各部位的动响应大小(包括位移、速度、加速度),而振动疲劳分析则是研究结构在动载荷作用下所具有的寿命,在多少个循环次数下结构会发生振动疲劳破坏。本文用飞机的一个故障案例(歼 8 飞机液压油管破裂分析)进行了振动疲劳分析和实际故障对比还是比较吻合的。结构动强度设计判据、准则和工作流程,则是本人几十年振动工作实践的总结,在结构振动领域内还是首次提出,是否合适还有待于工作实践的验证。

第六部分为第十七章,结构动力学设计的工程要求。这是本人参加了 7 个五年计划(从“六五”开始到“十二五”)的结构动强度课题预研工作(总装备部下达给空军装备部的课题研究工作),尤其是“九五”“十五”“十一五”和兄弟单位(中航工业 601 所、611 所、623 所,南航,西工大,中科院力学所等)一起,总结了预研工作的成果,从工程角度如何对结构振动工作提出原则性的要求,既是对预研工作的总结和概括,对今后的结构(设备)振动工作也有一定的指导意义。

本书所涉及到的各类振动问题对从事振动工作(不限于航空)有关设计、试验的人员都有一定的参考价值。

本人从 1970 年开始任 601 所强度室振动专业小组组长开始至今从事振动工作已有 44 年,本书中所总结的内容,除我自己的工作以外还有是和振动小组的成员共同努力工作的结果。特别是何连珠、张秀义两位老同志,以及中年的有朱广荣(已赴中国商飞工作)、刘月皎(已赴加拿大庞巴迪公司工作),年轻的有陈忠明、周敏亮、沈重、林莎、万玉成、冯世宁等同志,他们也做了大量的工作,在此一并表示感谢。

由于本人水平有限,本书还会存在一些差错或不当的提法,敬请读者批评、指正。

施荣明

2014 年 6 月于沈阳

目 录

第一章 振源描述	(1)
一、动力装置源	(1)
二、气动力源	(1)
三、机械源	(1)
四、其他动载荷源	(2)
第二章 振动标准	(3)
第一节 国内外振动标准的变化	(3)
一、国外振动标准的变化	(3)
二、国内振动标准的变化	(18)
第二节 振动试验的发展动向	(23)
一、飞机上真实的振动环境是什么	(23)
二、在飞机研制中遇到的振动问题	(24)
三、结构和设备动强度的保证	(25)
四、振动模拟试验方法的变化和发展	(25)
五、振动试验控制方法的变化和发展	(25)
六、振动环境激励模拟方法的变化和发展	(25)
第三节 GJB 150. 16A 振动试验方法中若干问题的说明	(26)
一、关于“控制方案”的说明	(26)
二、综合说明——振动环境试验的控制策略	(27)
三、关于“统计自由度的数不小于 120”的说明	(31)
四、关于 3 个“g”的说明	(31)
五、关于“外挂试验”的说明	(32)
六、关于“第 4 类—卡车/拖车/履带车—紧固货物”运输环境的说明	(38)
七、关于“第 12 类—固定翼飞机—喷气式飞机”振动环境条件的说明	(41)
八、关于“第 13 类—固定翼飞机—螺旋桨式飞机”振动环境条件的说明	(51)
九、关于“第 14 类—旋翼机—直升机”振动环境条件的说明	(54)
十、关于“第 15 类—飞机外挂—喷气式飞机组合式外挂”振动环境条件的说明	(59)
十一、关于八类振动试验的有关说明	(60)
十二、关于“关键共振响应”的有关说明	(64)
第四节 小结	(65)

第三章 振动规范	(67)
第一节 规范编写的背景、依据和内容	(67)
一、背景	(67)
二、内容和依据	(67)
第二节 规范编写的特点	(77)
一、对设计不确定系数和分散系数有了明确的规定	(77)
二、参考了世界上主要的先进的标准和规范	(81)
三、体现了新一代飞机的设计要求	(81)
四、本章内容涵盖了舰载机结构动力学方面的设计要求	(81)
第三节 规范 GJB 67A 和 GJB 67 的关系与区别	(81)
第四节 重要问题的有关说明	(82)
第四章 振动环境测量	(85)
第一节 飞机振动环境测量	(85)
一、传感器	(85)
二、记录装置	(87)
三、飞行状态的确定	(88)
四、应记录的飞行参数	(89)
五、××机测试点的布置和飞行状态的选择	(89)
第二节 炮击振动环境测量	(91)
一、炮击振动的特点	(91)
二、炮击振动环境测量的特点	(93)
第五章 振动环境数据分析	(99)
第一节 振动信号的分类和性质	(99)
一、确定性信号	(99)
二、随机信号	(101)
第二节 振动数据检验	(103)
一、振动数据分析的内容	(103)
二、振动数据检验	(104)
第三节 功率谱密度分析	(109)
一、功率谱密度的概念	(109)
二、功率谱密度的定义及相应的分析设备	(110)
第四节 模拟分析	(112)
一、功率谱密度分析的误差	(112)
二、模拟分析的参数选择	(116)
三、有关功率谱密度分析精度的几个问题	(120)

第五节 数字分析	(126)
一、数字分析的特点	(126)
二、相关数字分析	(137)
三、FFT 数字分析 (Fast Fourier Transforms)	(141)
第六节 数字滤波	(146)
一、数字滤波器的工作原理	(147)
二、递归数字滤波器	(148)
三、利用 FFT 实现非递归滤波	(151)
第七节 随机振动数据功率谱密度分析的统一性问题	(152)
一、为什么要统一	(152)
二、怎么统一	(152)
三、我们所做的工作	(152)
第八节 瞬态数据分析的特点	(154)
第六章 振动数据归纳	(155)
一、对原始数据的要求	(155)
二、数据转换	(155)
三、同一区域的归纳	(156)
四、同一类飞机的归纳	(156)
五、耐振强度试验量值和时间的归纳	(157)
第七章 振动环境标准制定	(158)
一、振动环境标准制定过程	(158)
二、振动环境标准分类	(158)
三、目前振动环境标准中的几个观点	(158)
四、当前振动试验标准中存在的问题	(162)
第八章 飞机振动故障实例 (以歼 8 飞机为例)	(163)
第一节 歼 8 飞机炮击振动故障分析与处理	(163)
一、概述	(163)
二、故障分析	(164)
三、结论	(167)
四、改进措施	(167)
第二节 歼 8 飞机方向舵振动故障分析	(169)
一、概述	(169)
二、故障分析	(171)
三、结论	(172)
四、改进措施	(172)
第三节 歼 8 飞机跨声速区振动故障分析	(172)
一、概述	(172)
二、故障分析	(173)

三、结论	(175)
四、改进措施	(175)
第四节 歼 8S 05 号机液压油管破裂分析	(175)
一、概述	(175)
二、故障分析	(176)
三、结论	(177)
四、改进措施	(178)
第五节 歼 8 飞机空速管壳体断裂问题分析	(178)
一、概述	(178)
二、故障分析	(179)
三、结论	(181)
四、改进措施	(181)
第六节 歼 8 飞机辅助进气门内蒙皮掉铆钉原因分析	(182)
一、概述	(182)
二、故障分析	(182)
三、结论	(183)
四、改进措施	(184)
第七节 歼 8 飞机发动机加力燃油总管振断事故分析	(184)
一、概述	(184)
二、故障分析	(184)
三、结论	(185)
四、改进措施	(185)
第八节 歼 8 飞机起落架放下后的振动问题分析	(186)
一、概述	(186)
二、故障分析	(186)
三、结论	(186)
四、改进措施	(186)
第九节 歼 8 飞机 KK-2 火箭弹滑膛问题	(187)
一、概述	(187)
二、故障分析	(188)
三、结论	(188)
四、改进措施	(188)
第九章 振动破坏机理	(189)
一、振动破坏模型分析	(189)
二、振动疲劳破坏	(189)
三、一次通过破坏	(191)
四、振动峰值破坏	(192)
五、小结	(193)

第十章 设备振动试验	(194)
一、正弦定频试验	(194)
二、正弦扫频试验	(194)
三、宽带随机试验	(195)
四、窄带随机试验	(196)
五、组合试验	(198)
六、加速试验	(198)
第十一章 设备安装的动强度设计要求	(200)
一、 $\times \times$ 外场飞机后设备舱左侧上层(10~13 框)外场普查情况统计	(200)
二、故障原因总体分析	(201)
三、结构改进解决措施	(206)
四、试验验证情况	(209)
五、设备安装结构动强度设计要求	(210)
第十二章 振动试验夹具的结构动力学设计	(217)
第一节 真实模拟试验夹具的要求来自于振动标准的要求和规定	(217)
一、平台/装备的耦合作用(见 GJB 150.16A 3.3.2 条)	(217)
二、加速度输入控制方法(见 GJB 150.16A 6.2.2.2 条)	(217)
三、力限控制方法(见 GJB 150.16A 6.2.2.3 条)	(217)
四、加速度限控制方法(见 GJB 150.16A 6.2.2.4 条)	(218)
五、加速度响应控制方法(见 GJB 150.16A 6.2.2.5 条)	(218)
第二节 结构动力学设计一般方法	(218)
一、结构动力学特性分析	(220)
二、结构动力学的灵敏度分析	(226)
三、最优化求解器	(235)
四、多频优化的结构动力学设计方法	(246)
五、频响优化的结构动力学设计方法	(251)
第三节 夹具的结构动力学设计方法	(255)
第十三章 动响应分析	(256)
第一节 系统的动态特性	(256)
一、动力问题的公式	(256)
二、系统的动态特性	(257)
三、系统的特征对	(261)
第二节 系统的动力响应	(268)
一、单自由度系统对确定性载荷的响应	(269)
二、多自由度系统对确定性载荷的响应	(270)
三、利用系统的动态特性求动力响应	(275)
四、随机输入的响应计算	(276)

第十四章 振动疲劳分析	(281)
一、结构共振分析	(281)
二、随机振动疲劳强度研究	(284)
第十五章 结构振动试验	(304)
一、结构动力学实验室试验	(304)
二、飞机地面试验	(306)
三、结构动力飞行试验	(307)
第十六章 结构动强度设计、判据、准则和工作流程	(310)
一、动强度定义	(310)
二、结构（设备）动强度工作内容	(310)
三、动强度判据、设计准则的研究	(311)
四、动强度设计工作流程图	(314)
第十七章 结构动力学设计的工程要求	(315)
一、飞机结构抗振动与噪声的设计要求及其验证	(315)
二、振动和噪声的控制设计	(315)
三、结构动力学设计	(316)
四、严重振动部位的振动设计	(317)
五、内埋武器舱的振动与噪声设计	(318)
六、带推力矢量发动机安装结构的振动设计	(319)
七、油箱、管路抗振设计	(320)
八、设备安装的振动设计与验证	(321)
九、导弹悬挂和抗导弹发射振动设计	(322)
十、抗鸟撞和外来物撞击振动设计	(323)
参考文献	(325)

第一章 振源描述

声和振动载荷环境应包括由下列载荷源（但不限于此）所产生的环境。

一、动力装置源

- (1) 螺旋桨噪声，包括桨叶通过载荷；
- (2) 喷气涡流噪声；
- (3) 当飞机在舰上弹射器的弹射位置，喷气偏转板升起时，以及当飞机处在升起的喷气偏转板之后，准备再次弹射状态时所经受的喷气涡流噪声；
- (4) 压气机或风扇噪声；
- (5) 燃烧噪声；
- (6) 喷口不稳定噪声；
- (7) 进气道不稳定噪声；
- (8) 推力反向装置产生的载荷；
- (9) 推力矢量装置产生的载荷；
- (10) 所有可能与推进系统有关的其他源。

二、气动力源

- (1) 边界层（旧称附面层）压力脉动；
- (2) 尾流引起的振动和噪声；
- (3) 空腔噪声；
- (4) 基本压力脉动；
- (5) 振荡激波；
- (6) 各种舱门及减速板打开时产生的扰动；
- (7) 武器发射时的压力冲击波；
- (8) 飞机凸出结构和不规则处表面，例如，发动机进气道前缘、机翼前缘外伸部分和雷达天线罩涡流发生器的尾迹涡系；
- (9) 辅助动力装置的噪声；
- (10) 所有可能和非定常气流现象有关的其他气动力源噪声。

三、机械源

- (1) 旋转部件的不平衡；
- (2) 武器发射力；
- (3) 辅助动力源，例如，泵、发电机和压气机；

- (4) 燃料晃动;
- (5) 所有其他机械现象。

四、其他动载荷源

- (1) 阵风 (又称突风)、抖振和外挂投放载荷;
- (2) 滑行、着陆、弹射和着陆拦阻装置载荷;
- (3) 着舰和着舰拦阻装置载荷。

第二章 振动标准

第一节 国内外振动标准的变化

一、国外振动标准的变化

1. 概况

国外环境振动标准主要有美国军用标准（简称美军标）MIL-STD-810 系列，英国 Def stan07-55 和 00-35 系列，以及苏联/俄罗斯的标准系列。具有代表性的是美国 810 系列。所以，这里以美国 810 系列标准为例说明之。

1967.6 MIL-STD-810B 美国设备环境试验方法

1975.3 MIL-STD-810C 美国设备环境试验方法

1983.7 MIL-STD-810D 环境试验方法和工程导则

1989.3 MIL-STD-810E 环境试验方法和工程导则

2000.1 MIL-STD-810F 环境工程考虑和实验室试验

2008 MIL-STD-810G（草案）（不是全文，现仅得到部分资料）

下面重点介绍 810D 和 810F。

MIL-STD-810C 以前，离我们现在比较遥远，已是 30 多年前的事了，标准已经比较落后，这里不再具体叙述。MIL-STD-810D 和 810E 从标准名称、内容来看，属同一种类型。MIL-STD-810E 是在 810D 基础上做了一些局部的改进，绝大部分内容 810E 是继承了 810D 的内容，但从 810C 到 810D 有很大的变化；另外 810F 和 810D、810E 又有很大的变化，所以要叙述美国环境振动标准的特征，以 810D 和 810F 为代表，比较能说明问题。而 810G 因为目前只有草案尚无正式版本，又没有获得 810G 的全文，只有部分内容——方法 525、527 及 528 三部分，从草案中我们可以看出它的一些发展趋势，所以，只能就某些方面来加以说明，全面来分析 810G 为时过早。

环境振动标准内容很多，这里仅就和我们试验设备、装置有关的方面进行讨论，因此，每种标准只介绍其振动试验方法、振动控制方法和振动环境模拟方法三部分内容。

2. 810D（方法 514.3 振动）

（1）810D 的振动试验方法

①正弦定频试验

正弦定频试验是对试验件进行不变频率的正弦激励试验。它可分为定频试验、共振模拟试验和共振试验三种。

定频试验是最早出现的一种振动环境试验方法。随着生产的迅速发展，人们对振动环境认识的深入和模拟振动环境的试验手段的完善，此类早期的试验方法已基本上不被

采用。

振源模拟试验则是对飞行器存在的单频振源，如螺旋桨飞机桨叶频率下的振动环境进行模拟的试验。其激励频率为实际存在的振源频率。该试验的目的是考核设备在此振源作用下能否正常工作。

共振试验。它是以设备的共振频率为激励频率进行的正弦定频振动试验。进行此项试验是基于共振对设备引起的破坏远比非共振对设备引起的破坏严重。如果找到的共振频率多于一个，通常取品质因子高的前三阶至前四阶进行试验。

试验设备：凡是能产生试验条件所要求的振动试验设备均可用于此项振动试验。

②正弦扫描试验

正弦扫描试验是对样品进行频率连续变化的振动试验。

试验设备：能在规定的频率范围内，按规定的量值和规定的频率变化规律由低频到高频，再由高频到低频对样品进行振动激励的所有设备。

③窄带随机扫描试验

它是一个窄带随机振动，具有恒定的带宽，其中心频率应在规定的频率范围内，由低频到高频，再由高频到低频进行扫描，其量值是恒定加速度（有效值）或恒定加速度梯度（加速度与频率平方根之比）。

试验设备基本上和正弦扫描试验设备相同。只不过信号源不一样。进行窄带随机试验时需用一个窄带信号发生器来代替正弦信号发生器。

④宽带随机试验

由于使用中的振动环境基本上是随机的，因此用随机激励试验来模拟实际存在的随机振动环境是一个理想的环境模拟试验方法。随机试验，通常均指宽带随机试验，是一种使输入的振动能量谱在关心的频段内（通常取 20 ~ 2000Hz）达到预计或实测得到的要求值，并在给定的试验持续时间内保持不变的试验。宽带随机试验也就是在整个试验频段内同时进行激振的试验。

试验设备：

模拟式——由随机信号源和均衡系统组成。

数字式——随机数控系统具有模拟随机控制系统中的信号源、均衡器系统的功能。数控的原理是利用数值计算机的特点，先把振动台的频响特性（用控制加速度计的信号）求出，然后根据所要求的谱求出与此特性相反的谱，由计算机做反傅里叶变换计算出一个随机信号输送给功率放大器。

除上述以外还有保护装置、功率放大器和激振器等组成。

⑤宽带随机加正弦试验

如果实测的振动环境是随机基础上叠加正弦，那么，最好的模拟办法是采用宽带随机加正弦的试验方法。此试验方法是把宽带随机激励和正弦激励同时施加到样品上。因此，进行这类试验要求均衡系统能把试验系统均衡成在预定随机谱形状上叠加一个预定的正弦，还要把输出控制在所要求的加速度有效值上。

⑥宽带随机加窄带随机试验

这种试验和宽带随机加正弦试验一样，是以宽带随机谱为其背景叠加窄带随机。如

果尖峰信号的中心频率不变,即谱型是固定的。它可以在随机均衡系统和保护装置之间另加“峰—谷”均衡器。该试验方法是宽带随机和窄带随机试验的组合。

⑦跑车试验

跑车试验是一种真实的运输环境试验。对于那些大型的样品,采用实验室来模拟其运输振动环境,往往难以达到且经济上不合算。因此采用跑车试验。

(2) 810D 的振动控制方法

①输入控制

输入控制是传统的振动试验控制方法。这种试验形式应从支撑平台向平台上的设备提供理想的振动输入。当设备的重量^①负载能明显改变平台特性时或当实际使用激励同时施加到整个结构的各个部分(如气动扰流)而不是通过少数几个特殊的连接点进行激励的时候,不应该用输入控制。

②响应控制

响应控制试验基本上不规定输入,代之以尽量达到设备结构预期的或在使用中测得的典型响应值。当已测得使用振动环境并且实验室和实际使用条件相互之间很容易达到一致或接近的时候,这种方法是适用的。

(3) 810D 的振动环境模拟方法

①激励模拟

a. 试验轴向

在特定的程序中若无另行规定,试验件应沿互相垂直的三个轴向激励。激励应沿每个轴进行,每次一个轴向,或同时沿两个或三个轴向施加。

b. 振源模拟试验

在某些情况下,振动环境的特点是周期性的,它们是由往复式的或旋转的结构和机械(如旋叶、螺旋桨、活塞、炮击)的激励所引起的。这些激励可通过流体(空气或液体)或结构进行传递。当这类形式的激励在关键频带上占主要成分时,做振源模拟试验是恰当的。作为振源模拟试验的振动激励可以是宽带随机、窄带随机或者是一个或更多的正弦波。

该类试验技术和传统的正弦谐振定频试验不同,谐振定频强调整试验件在谐振处的频率,振源模拟试验则强调突出装机环境的这些频率。显然,振源模拟频谱为更真实的试验创造了条件。振源模拟试验应使用下列方法之一进行。

(a) 在设备支架的基频和倍频的中心振动峰值处进行宽带随机激励。

(b) 窄带随机叠加在一个低量值宽带随机背景信号上,使这个宽带随机背景信号在基频和倍频的中心频率处有窄带随机峰(注:窄带信号也可以是通过装机状态典型频带的扫描)。

(c) 或单独或同时在基频和倍频处进行正弦输入,也可以在一个低量值的随机背景上叠加正弦(注:正弦输入可以通过装机状态典型频带的扫描)。

c. 随机振动

^① 本书所提重量均为质量(mass)概念,单位为 kg, t 等。

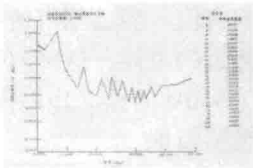
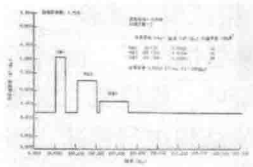
经分析确定，设备在使用工作状态所经受的主要振动是宽带频谱，也就是在全部作用时间内各种强度组合的所有频率都出现。对比试验已经证明对随机振动来说模拟宽带激励是最有效的。因此，本方法大多数振动试验都采用宽带振动试验。

②单一环境和复合环境模拟

- a. 振动（方法 514.3）
- b. 炮击振动（方法 519.3）
- c. 温度 + 湿度 + 振动 + 高度（方法 520.0）
- d. 声 + 振动 + 温度（方法 523.0）

③环境模拟

表 2-1 MIL-STD-810D 的振动环境及模拟试验方法

	振动环境描述		模拟试验方法	振动谱型
运输环境	1. 基本运输	轮式车辆	宽带随机	
		履带车辆	宽带叠加窄带随机	
	2. 大型组合件运输		跑车试验	无规定谱型
	3. 散装件的运输		颠簸试验台	无规定谱型
使用环境	4. 螺旋桨飞机（涡轮发动机）		宽带叠加窄带随机	