

DIANZISHEBEIZHENDONGFENXIYU

DONGFENXISHIYUSHIYAN DIAN

SHIYAN DIANZISHEBEIZHEN

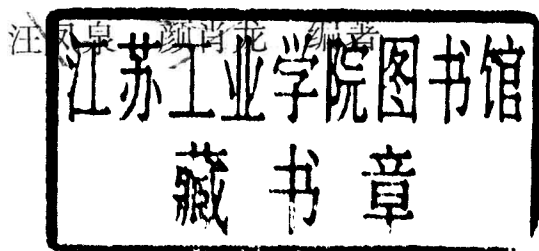
电子设备 振动分析与试验

季馨 主编

东南大学出版社

电子设备振动分析与试验

季 馨 主编



东南大学出版社

(苏)新登字第 012 号

内 容 简 介

全书共分九章。内容包括机械电子设备振动信号的基本特征、单自由度系统、多自由度系统、连续弹性体、非线性振动、振动测量、环境试验、模态分析、故障诊断和隔振系统的动态特性设计等内容。

本书可作为高等工科院校有关专业的教材,也可作为研究生和从事电子设备结构设计的工程技术人员的参考书。

责任编辑 徐步政

电子设备振动分析与试验

季 馨 主编

东南大学出版社出版发行

地址: 南京四牌楼 2 号 邮码: 210018

南京佳美电脑印刷厂印刷

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 17.125 字数 445 千字

1992 年 10 月第 1 版 1992 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1-2000 册

ISBN 7-81023-712-8

TH·39

定价: 9.80 元

前 言

振动理论与试验动态分析是电子设备结构动态分析与优化设计的重要基础和专业内容，是有关专业的必要课程。作者结合教学、科研与工程实践，为电子设备结构设计专业提供了这本专业课教材。

在内容上，本书以电子设备结构振动为背景，力求反映近代振动分析、振动设计和振动工程中的最新成果。在结构上，力求深入浅出、注重基础、突出重点，以便于读者学习与实用。

本书以电子设备结构的线性振动分析为主体，以其矩阵分析和模态分析为重点，同时也适当地介绍了非线性系统的定性分析和近似数值解法。此外，本书还介绍了电子设备的振动与冲击测试技术和振动环境试验方法，它们是电子设备可靠性分析的重要内容和必要手段。

第一章介绍了电子设备可能遇到的各类动态环境和环境试验要求。着重讨论了振动、冲击等动态环境对设备造成的危害。

第二章介绍了振动信号的基本特性，以后各章将直接引用本章的结论，而无需重复叙述。

第三章为单自由度系统的振动分析，着重介绍了固有频率的概念及计算方法、单自由度系统对各类激励的响应求解方法等。从而给出了振动理论分析最基本的物理概念。

第四章为多自由度系统的振动分析，它是本书的重点之一。在本章中较系统地介绍了模型的建立、矩阵分析和模态分析方法。并结合工程实际，给出了固有频率的数值解法。

第五章以杆的纵向和梁的横向振动为基础，介绍了连续弹性体振动的基本特征和分析方法。本章还对工程中常用的近似分析法一

一有限元法的基本理论和求解方法作了简要介绍。

第六章中仅给出了非线性振动系统的基本理论以及定性分析和求近似解的定量分析的主要方法。

第七章介绍了电子设备振动、冲击试验设备和测试系统。较详细地讨论了振动冲击环境试验的种类、目的要求、试验方法及评价指标,以及危险频率测试方法等。

第八章介绍了机械电子设备的模态分析技术与参数识别方法。在第四章的基础上,首先介绍了模态理论和试验模态分析技术,然后给出了振动参数辨识的频域、时域和时频域识别方法。

第九章介绍了隔振、缓冲系统的动态特性要求及工程实际中的解耦设计方法、缓冲包装设计的基本理论和设计、试验方法。同时,以典型的高性能隔振器为例,介绍了采用刚度拟合原理,实现较理想的动态特性的设计方法。

本书由季馨主持编著。其中第一、二、三、四、九章及第7.3节由季馨编著,第五、六章由颜肖龙编著,第七、八章由汪凤泉编著。

在本书编写过程中,李玲珍负责全书校对、贴图等工作。另外,在校对过程中还对原稿中某些笔误提出了修改意见。马红霞负责全书的描图工作。湖南大学朱光汉教授无私地提供了有关缓冲包装设计的最新资料。尹寿宝工程师提供了国内隔振器标准科研的最新成果。谨借本书出版之际,向所有给予我们帮助和鼓励的朋友致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,错误和不适之处在所难免,恳请读者给以指正。

作者

1992.6 月

目 录

第一章 概论	1
§ 1.1 电子设备的工作环境和环境条件试验	1
§ 1.2 电子设备的机械环境	4
§ 1.3 机械环境中电子设备的可靠性	6
§ 1.4 振动控制	8
第二章 振动信号的基本特性	10
§ 2.1 周期振动和准周期振动	11
§ 2.2 非周期信号 傅里叶变换和连续频谱	21
§ 2.3 平稳随机振动	30
§ 2.4 非平稳随机振动	45
第三章 单自由度线性系统的振动	47
§ 3.1 离散振动系统的力学模型	47
§ 3.2 单自由度系统的自由振动	49
§ 3.3 单自由度系统的强迫振动	60
§ 3.4 系统对非谐和周期激励力的响应	79
§ 3.5 系统对非周期激励的响应	88
§ 3.6 拉氏变换和传递函数	99
§ 3.7 冲击隔离	109
§ 3.8 单自由度系统对平稳随机激励的响应	120
第四章 多自由度系统的振动	130
§ 4.1 固有频率和主振型	130
§ 4.2 有阻尼系统的模态分析	155
§ 4.3 离散多自由度系统数值解	158
§ 4.4 二自由度系统受谐波激励的响应	175

§ 4.5	电子设备的隔振设计	186
§ 4.6	多自由度系统对非谐周期激励和一般激励的响应	204
§ 4.7	多自由度系统对随机激励的响应	207
第五章	连续弹性系统.....	219
§ 5.1	概述	219
§ 5.2	杆振动	219
§ 5.3	梁的横向振动	225
§ 5.4	梁的振动响应	238
§ 5.5	近似解法	244
§ 5.6	有限单元法	263
第六章	非线性振动.....	285
§ 6.1	概述	285
§ 6.2	相平面法	286
§ 6.3	非线性自治系统的自由振动	301
§ 6.4	非线性系统的强迫振动	313
第七章	振动测量与试验.....	322
§ 7.1	机械振动的测量系统	322
§ 7.2	激振设备	348
§ 7.3	电子设备振动冲击环境试验	361
§ 7.4	电子设备系统危险频率测试	393
第八章	电子设备的模态分析与参数识别.....	400
§ 8.1	振动模态理论	400
§ 8.2	振动模态试验	407
§ 8.3	振动模态参数识别的纯模态方法	424
§ 8.4	振动模态参数识别的频域法	439
§ 8.5	模态参数识别的时域法	448

第九章 隔振缓冲系统动态特性设计	456
§ 9.1 隔振器的主要动态特性指标 传递率	457
§ 9.2 隔振器的动态特性设计	482
§ 9.3 缓冲包装设计	502
附录	522
附录 I: 金属干摩擦(GM)隔振器(SJ2608-85)	522
附录 II: 平板型(JP)、碗型(JW)隔振器(SJ2609-85)	529
附录 III: 空气阻尼隔振器(JQZ)、金属网阻尼隔振器 (SJ 2610-85).....	534
参考文献	539

第一章 概 论

§ 1.1 电子设备的工作环境 和环境条件试验

电子设备在航空、航天、海洋科学、国防科学、生物科学、医学科学以及国民经济的各个部门都得到了广泛的应用。电子设备在生产、运输、储存和运行的各个过程中,都经受着各种自然或人为的环境条件的考验,并且常常要求在某些严酷的环境条件下安全可靠地工作。

1.1.1 环境条件分类

典型的自然或人为的环境条件有温度和气候环境条件、生物环境条件、机械环境条件、电磁环境条件、化学腐蚀性环境条件和其它环境条件等。国家标准《电工电子产品基本环境试验规程》中给了这些环境条件和试验方法。试验方法的编号用英文大写字母表示(表 1.1),每种试验方法又有细项,用英文小写字母表示。基本的环境条件试验和国家标准代号见表 1.2。

电子设备应根据其工作时的环境条件,在表 1.2 中选取相应的试验项目。不同类型、不同使用场合的电子设备,其严酷等级的要求是不同的,读者可根据有关标准或技术文件(设计任务书)中规定的要求加以选取。例如,对于在有空调设备的室内工作的电子设备,它们仅需承受一般条件下的温度($15\sim 35^{\circ}\text{C}$)、湿度(相对湿度 $45\%\sim 75\%$)和大气压强($86\sim 106\text{Pa}$)的考验。而对于在运载工具上工作的可移式电子设备,则必须经受更严酷的

温度 ($-75^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$)、湿度 (相对湿度 $\leq 20\% \sim 100\%$) 以及低气压 ($1 \sim 84\text{Pa}$) 等环境条件的考验。

表 1.1 试验方法编号规则

试验方法编号	试验方法名称	试验方法编号	试验方法名称
试验 A	低温试验	试验 N	温度变化
试验 B	高温试验	试验 P	可燃性
试验 C	恒定湿热试验	试验 Q	密封
试验 D	交变湿热试验	试验 R	待定
试验 E	冲击和碰撞	试验 S	辐射(太阳辐射或核辐射)
试验 F	振动	试验 T	锡焊(含锡焊温度冲击)
试验 G	恒加速度	试验 U	接端的牢固性
试验 H	贮存	试验 V	声学噪声
试验 J	长霉	试验 W	待定
试验 K	腐蚀性大气	试验 X	标志保持性试验
试验 L	砂尘	试验 Y	待定
试验 M	空气压力	试验 Z	综合或组合试验

1.1.2 环境条件试验和组合环境试验

环境条件试验是人们利用实验装置模拟各种自然的或人为的环境条件, 对电子设备所进行的试验。

环境条件试验标准使环境条件的严酷等级、试验方法、评价指标等规范化。这样可以使不同地点、不同实验设备上的试验具有相同(或等价)的效果。这些标准除前节已提到的国家标准(GB)外, 还包括国家军用标准(GJB)、各军兵种、各工业部门和各企业的有关标准。

表 1.2 电工电子产品的基本环境试验

环境分类	试验方法编号	试验名称	标准代号
温度、湿度、气压等大气条件	试验 A	低温试验方法	GB 2423 · 1
	试验 B	高温试验方法	GB 2423 · 2
	试验 C _a	恒定湿热试验方法	GB 2423 · 3
	试验 D _b	交变湿热试验方法	GB 2423 · 4
	试验 M	低气压试验方法	GB 2423 · 21
	试验 N	温度变化试验方法	GB 2423 · 22
机械环境条件	试验 E _a	冲击试验方法	GB 2423 · 5
	试验 E _b	碰撞试验方法	GB 2423 · 6
	试验 E _c	倾跌与翻倒试验方法	GB 2423 · 7
	试验 E _d	自由跌落试验方法	GB 2423 · 8
	试验 F _c	振动(正弦)试验方法	GB 2423 · 10
	试验 G _a	恒加速试验方法	GB 2423 · 15
生物环境	试验 J	长霉试验方法	GB 2423 · 16
腐蚀性环境条件	试验 K _a	盐雾试验方法	GB 2423 · 17
	试验 K _c	接触点和连接件的二氧化硫试验方法	GB 2423 · 19
	试验 K _d	接触点和连接件的硫化氢试验	GB 2423 · 20
光辐射环境条件	试验 S _a	模拟地面上的辐射试验方法	GB 2423 · 24
组合环境条件	试验 Z / AM	低温 / 低气压综合试验	GB 2423 · 25
	试验 Z / BM	高温 / 低气压综合试验	GB 2423 · 26
	试验 Z / AMD	低温低气压湿热综合试验	GB 2423 · 27

由于我国科技水平和实验设备等条件的限制, 目前大多数环境

条件试验还是按单项试验进行的（即单一环境条件的模拟）。二类或二类以上的组合试验目前尚未广泛进行。单项试验不仅试验项目多、时间长、费用高，而且也不能反映多种环境条件共同作用时，各种环境条件相互影响对电子设备造成的加速破坏。而电子设备在实际工作时，却往往处于这种复杂的组合环境条件之中。因此，单项试验是有局限性的。实验证实，碳钢在自来水中试验时，其持久极限将降低 50% 以上，在盐雾、海水中将降低得更多。

联合（组合）环境条件试验可避免单项试验的局限性。国内航天部已采用低温加振动的组合试验来考核低温下的材料特性；用高温、高湿、盐雾、振动的组合试验来考核材料的腐蚀疲劳特性等。这不仅减少了试验时间，而且也极大地提高了试验结果的可靠性。

§ 1.2 电子设备的机械环境

1.2.1 电子设备的机械环境和激励信号分类

上节介绍了电子设备的复杂环境条件及有关的试验方法，本节关心的是电子设备的机械环境条件。设备在生产、运输和使用过程中通常遇到的机械环境条件主要来自二个方面：

(1) 电子设备内部的振源，如风机、电动机、继电器、变压器等引起的振动和冲击；

(2) 电子设备的运载工具中的发动机以及外界的振动、冲击和声激励等等。例如，汽车在不平路面上行驶时所产生的振动以及因启动、刹车或加速时引起的冲击；舰船受风浪、炮击、水下爆炸等激励所引起的振动和冲击；火车行驶时由于轮子的不圆度或车轮在钢轨接缝处撞击所激起的振动和冲击；飞机在起飞、降落和飞行时产生的振动和冲击；导弹、火箭起飞时引起的振动和冲击等等。

尽管各种载体所引起的振动和冲击的形式多种多样，综合分析其本质，可将激励信号分为如下几类：

(1) 周期性激励信号；

- (2) 冲击和随机激励信号;
- (3) 恒加速度激励信号;
- (4) 声激励信号;
- (5) 其它激励信号。

第二章将详细介绍激励(或响应)信号的基本特征。

1.2.2 机械环境对电子设备可靠性的影响

1.2.2.1 性能下降

强烈的机械振动和冲击可使电子设备结构产生动态弹性变形。当动态变形足够大时,常会出现如下情况:

- (1) 使速调管的电子束无法顺利地通过谐振腔腔口,电子束打到腔口而造成发热量增大及发射功率下降;
- (2) 因可变电容器极板间距变化造成通信机本机振荡频率或发射频率的漂移;
- (3) 使接插件触点接触不良造成时断时续;
- (4) 继电器发生误动作;
- (5) 结构件(如转轴等)转动不良,甚至无法操作等等。

我们称这些现象为性能降低。它们的特点是,当把激励的量级(即严酷等级)降低后,这些现象会得到改善或完全消失,电子设备又能正常工作。

在规定的性能指标下,使电子设备无法可靠工作的最小激励值可称为电子设备的强度下限(或称脆值、许用值)。

1.2.2.2 失效或损坏

电子设备的失效或损坏形式主要有以下二种:

- (1) 因强烈的振动冲击,使电子设备的元器件和结构件的应力超过其强度限或屈服限,造成了断裂或永久性变形。

最常见的损坏形式如电子管灯丝折断、元器件引线拉断、焊点脱开、显示器破碎、橡胶隔振器中的橡胶件与金属外壳间脱离以及联接件拉断等等。

(2) 由于振动引起的累积疲劳破坏。

最常见的如接插件、继电器、隔振器等器件中的弹性元件的弹性下降，甚至完全失去弹性；联接螺栓断裂、元器件引线、焊点因疲劳而断裂等等。

振动冲击引起的性能下降、失效或损坏都将直接影响电子设备的可靠性。

§ 1.3 机械环境中电子设备的可靠性

安全可靠性是各类电子设备的重要指标，也是机械、电子工业和其它有关学科共同关心的问题。

1.3.1 故障率曲线

根据可靠性理论，电子设备在生产、运输和使用的整个时间历程中，如不加以维修，则故障出现的几率——故障率可由图 1.1 所示曲线来表示。

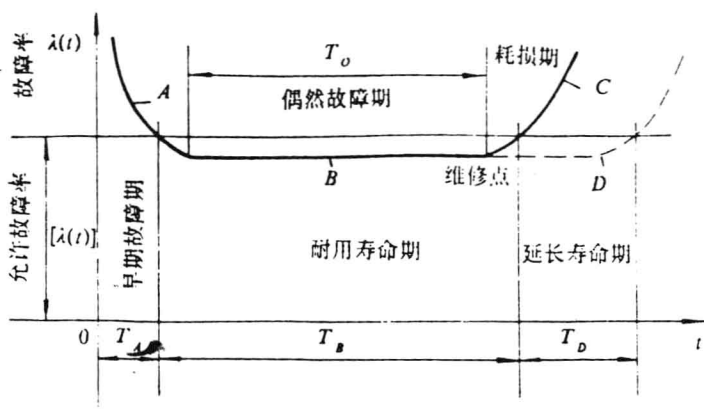


图 1.1 故障率曲线

由于该曲线呈盆状，故又称为浴盆曲线。故障率曲线所描述的故障率（包括图中虚线部份）分为三段，对应的时域也分为三个时期。

早期故障期(T_A): 由于制造中的缺陷或隐患较多，故障率也较高。通过试验排除早期故障后，故障率是递减的。 A 曲线段是递减故障率曲线。

耐用寿命期(T_B): 由于一般故障已在第一阶段排除，在实际使用中，除出现偶然故障外，其故障率将维持在规定的故障率以下，并且逐步呈现恒定值。 B 曲线段是恒定故障率曲线。

耗损寿命期(T_C): 由于长期地工作，部份元器件已接近使用寿命，并且元件也因疲劳、磨损等原因出现性能下降。它们都工作在“拼消耗”状态，故障率不断增加。 C 曲线为递增故障率曲线。

延长寿命期(T_D): 在设备使用到即将进入耗损寿命期之前的 O 点，对设备进行维修和保养，更换已到使用寿命的元器件及结构件，使故障率仍低于规定值。曲线将沿 OD 延伸，从而延长了使用寿命。过早或过迟地对设备进行维修保养都将影响到设备的维修成本和使用寿命。通过合理地振动监测与故障诊断，可实现按状态进行维修的方法，使维修费用及故障率大为降低。

1.3.2 振动理论分析

在本世纪 60 年代以前，振动理论分析主要着重于完善线性系统振动理论，以及对非线性系统的振动特点和求解方法的研究。70 年代以来，由于电子计算机技术的发展，振动理论分析得到迅速地发展和完善。其主要表现在从振动的线性理论向非线性理论研究发展；从保守系统理论向非保守系统理论研究发展；从稳态随机振动理论向非稳态随机振动理论研究发展；从单一学科理论研究向着多学科理论综合研究方向发展等等。特别是近年来迅速发展的、用于提高计算精度和计算效率的动力有限元分析理论、模态分析理论和振动计算方法（如有限元计算方法、统计能量计算方法和数值计算方法等）的发展，为振动系统的模态分析和参数识别技术、结构动

力修改技术等的发展提供了有力的支持，也为振动试验分析提供了强有力的理论依据。

1.3.3 试验振动分析

由于电子设备是一个十分复杂的设备(或系统)，在进行计算时，不得不对其进行较多的简化或假设；同时，由于材料的不均匀性和内部缺陷，以及工艺和结构设计中的失误或缺陷，这就使得振动计算分析的结果具有一定的误差和不确定性。因此，实验分析就显得更加重要。振动实验分析有二个最基本的任务：

(1) 通过振动实验分析可以确定(识别)类同电子设备或现有样机的振动特性和动态参数，为新设计的电子设备的振动计算设计提供可靠数据，这将极大地提高振动计算分析的准确度。另外，还可通过对电子设备的在线检测和故障诊断技术，迅速、准确地预测故障出现的部位并加以排除。同时，还可以较准确地确定维修点 O 出现的时刻，从而既可以提高电子设备的可靠性，又可以降低其维修成本。

(2) 通过振动实验分析可暴露现有电子设备结构工艺中的缺陷、薄弱环节或元器件的选型不当等问题，为进行设备的结构修改提供依据。并且可将试验时暴露的故障排除，使早期故障率阶段(图 1.1 中的 A 曲线段)仅仅出现在实验室试验时期。这样，就可以使电子设备在出厂后立即处于耐用寿命期，且工作安全可靠。

振动实验分析的重要性已日益被人们重视，理论和实践方面的发展也很迅速。这就需要我们掌握有关实验设备、实验方法和实验分析的基本知识。本书将有较多章节介绍这方面的内容。

§ 1.4 振动控制

振动控制有二个基本的组成部份——加固设计以及振动与冲击隔离。

加固设计是在振动理论分析与振动实验分析基础上,筛选出抗振抗冲击特性较好的结构件和元器件,使电子设备在不加装任何隔振缓冲器的情况下,就能在各种严酷的机械环境条件下安全、可靠地工作,这是加固设计追求的目标。

由于受技术条件或经济成本方面的限制,有时很难实现上述加固设计的要求。采用隔振缓冲技术,减少或避免外界激励对电子设备的有害影响,这便是振动冲击隔离技术。

振动冲击隔离技术是在由 1.1.1 节得到的环境条件严酷等级(即环境条件界限),和通过 1.3.2 和 1.3.3 节得到的电子设备许用响应值(即电子设备的强度下限)的前题之下,通过对电子设备附加隔振缓冲器来进行保护的技术措施。其基本设计思想是通过隔振器传递给设备的激励值(即设备的响应值)始终小于设备的许用值。换句话说,即使隔振器的传递率小于设备的许用传递率。若定义设备的许用传递率

$$[\eta] = \frac{\text{设备许可响应值}}{\text{环境条件界限}} = \frac{[A]}{A_p}$$

时,那么,当隔振器的实际传递率为 $\eta_{\text{实}}$ 时,则应有

$$\eta_{\text{实}} \cdot A_p \leq [A] \text{ 或 } \eta_{\text{实}} < [\eta]$$

A_p ——为广义激励的峰值。它可以表示位移、速度、加速度和力。

$[A]$ ——为广义的许用响应值。它可以表示位移、速度、加速度和力。

但传递率应为同一物理参数的峰值比。

隔振缓冲设计所需的隔振器及隔振系统设计的基本知识,将在本书有关章节中加以介绍。