

# 航天动力学环境设计与 试验指南

吴永亮 何玲 樊世超 编著



科学出版社

# 航天动力学环境设计与试验指南

吴永亮 何 玲 樊世超 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统论述了航天飞行器动力学环境设计、试验环境条件预示与计算等,主要内容包括:航天飞行器在其寿命周期内所经历动力学环境的分类及任务事件、动态激励或动力学环境引起的载荷预示方法、结构环境激励响应预示方法、动力学最大预期环境计算方法、动力学环境在最大载荷处持续时间的计算方法、动力学环境设计与试验准则、动力学环境试验过程中需要考虑的问题等。本书为航天产品设计人员提供了全面、详尽的动力学环境设计与试验工作指导,对于推动航天技术发展、提升我国航天飞行器产品研制能力具有重要意义。

本书适合科研院所中从事航天工程型号总体设计、载荷与动力学环境设计等专业研究的科技人员使用,也可供高等院校航空宇航推进理论与工程、飞行器设计与工程等专业的研究生和教师参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

航天动力学环境设计与试验指南 / 吴永亮,何玲,樊世超编著. —北京:科学出版社,2018.9

ISBN 978-7-03-058889-0

I. ①航… II. ①吴…②何…③樊… III. ①航天器-动力学-环境设计  
②航天器-动力学-试验 IV. ①V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 216488 号

责任编辑:陈 婕 赵微微 / 责任校对:张小霞

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年9月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:272 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

卫星和运载火箭(简称火箭)作为体现航天技术发展的主要载体,其研制、发射和运行是一项庞大的系统工程,而动力学环境问题是其制造到完成任务过程中必须考虑的重要问题,在其设计、试验、飞行等各阶段中涉及。动力学环境分析方法及试验技术的正确性与合理性直接影响卫星和火箭的设计水平,甚至决定航天任务的成败。卫星与火箭在全寿命周期经受的环境并不完全相同。卫星在制造总装、地面运输、发射入轨、在轨运行以及主动返回等阶段要分别经历复杂的地面总装环境、地面试验环境、地面运输环境、发射环境、空间环境和返回环境,这些环境统称为卫星环境。火箭的主动段发射任务完成后即宣告任务终止,因此其环境因素一般只涉及总装、试验、运输和主动段发射等阶段。

力学环境是卫星环境和火箭环境的重要组成部分,是指卫星和火箭产品经受的振动、冲击、噪声、加速度和微重力等环境。力学环境可分为静力环境和动力环境。静力环境主要是指卫星和火箭经历的准静态环境,如发射段的准静态加速度过载、卫星发动机在轨工作过程中引起的整星过载、返回式卫星在返回减速过程中承受的过载等。动力环境则是指能够产生时变扰动激励(亦称外力函数或动力载荷)的所有现象,这些扰动激励直接或间接施加在火箭和卫星及其部组件上,如整流罩内的声环境、卫星和火箭对接面上的随机振动环境、火箭级间分离产生的瞬态振动环境、星箭分离时包带解锁引起的冲击环境等。由于航天飞行器(简称航天器)对重量的要求比较苛刻,其设计都需要从质量角度上考虑,由此产生了诸多问题,而引起这些问题的原因是动力学环境,因此必须认识火箭、航天器及其他飞行器在执行任务过程中的动力学环境及效应。

航天动力学环境和环境设计准则与其他行业相比有其自身特点,因此美国宇航局制定了 NASA-HDBK-7005《动力学环境准则》。国际上通行动力学环境(包括设计准则)标准以 MIL-STD-810 为代表,现行版本是 G 版。MIL-STD-810 是美国国防部标准,先于 NASA-HDBK-7005 发布。MIL-STD-810 中的基本做法是将平台与载荷分开处理,先通过平台测量环境,再通过实测数据得到载荷的环境。在设计飞机、船舶和汽车需考虑动力学环境时,先解决平台的

问题,再解决机(车)载设备的问题。因此,MIL-STD-810 强调实测数据和数据统计,适用于飞机、船舶和汽车等动力学环境试验。因为航天的特殊性,需要同时考虑平台与载荷即运载和卫星(有效载荷),且难以得到实测数据,所以 MIL-STD-810 不能满足航天的实际需求。NASA-HDBK-7005 提出了一个综合的办法,就是将航天动力学环境按事件处理,分为载荷预示(即激励环境)方法、响应预示方法和数据统计方法。该方法不强调实测,而强调环境预示和响应预示,可以较好地适用于航天动力学试验。

美国宇航局发布 NASA-HDBK-7005《动力学环境准则》的目的是规定一致的和通用的操作程序,规范飞行器及其有效载荷的动力学设计、结构设计和鉴定、验收试验等方面的操作,提高结果的一致性。该准则系统地总结和评估了产品任务的动力学环境预示方法、动态激励或力学环境引起的载荷预示方法、结构环境激励响应预示方法,以及为航天器从系统级到零部件级产品的设计和试验所制定的动力学容差标准程序方法,总结了试验设备和试验过程。在目前的航天器型号研制过程中,动力学环境的预示往往由设计师根据型号任务的特点和需求确定,没有形成统一的规范,甚至部分动力学环境的预示方法可能还不够完善,力学环境的设计与试验要求和余量分散于大量的型号设计文件、不同的设计师手中,不同航天器的动力学环境设计与试验方法之间没有统一的标准。因此,需要对国内外航天器力学环境设计与试验方法进行调研、分析和比较,并根据国内航天器研制的经验和教训,系统性地分析航天器力学环境预示方法以及环境设计和试验准则,得出共性结论。本书基于 NASA-HDBK-7005《动力学环境准则》,结合国内工程实际编写而成,为我国航天工程技术人员进行动力学环境设计与试验提供指导。

全书共 8 章,其中第 1 章由吴永亮、李小龙、卫巍编写;第 2 章由何玲、韩晓健、李栋编写;第 3 章由李正举、刘波、崔颖慧编写;第 4 章由王帅、张建华编写;第 5 章由贾亮、王竞男编写;第 6 章由樊世超、杨艳静、武耀编写;第 7 章由王旭、曾杜娟编写;第 8 章由冯国松、高海洋编写。全书由吴永亮、何玲、樊世超统稿。

魏永刚研究员、向树红研究员、朱凤梧研究员、张小达研究员等专家审阅了书稿,并提出了宝贵意见,给予了极大的帮助,在此表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

第 1 章 分类、描述和任务事件	1
1.1 动力学环境的分类	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 确定性动力学环境	2
1.1.3 随机动力学环境	3
1.2 动力学环境描述	4
1.2.1 概述	4
1.2.2 时间历程	5
1.2.3 均值	5
1.2.4 线谱	6
1.2.5 自谱	6
1.2.6 波数谱	7
1.2.7 倍频程谱	8
1.2.8 最大谱	8
1.2.9 傅氏谱	8
1.2.10 能量谱	9
1.2.11 冲击响应谱	9
1.2.12 互功率谱的相干函数	10
1.2.13 频率响应和脉冲响应函数	11
1.3 动力学环境任务事件	11
1.3.1 概述	11
1.3.2 运输	12
1.3.3 发射前的地震载荷	12
1.3.4 风和紊流	13
1.3.5 火箭发动机点火超压	14

1.3.6	起飞释放载荷	14
1.3.7	发动机喷流噪声	14
1.3.8	发动机产生的由结构传播的振动载荷	15
1.3.9	气动噪声	15
1.3.10	发动机推力瞬变	16
1.3.11	上升过程中的机动载荷	17
1.3.12	POGO 振动	17
1.3.13	固体发动机压力脉动	18
1.3.14	箱体内液体晃动	18
1.3.15	级间和整流罩分离载荷	18
1.3.16	火工品引爆产生的载荷	19
1.3.17	飞行操作过程中产生的载荷	21
1.3.18	在轨运行中的振动载荷	21
1.3.19	行星降落、进入行星大气层及着陆	22
1.3.20	地表穿透	23
1.3.21	空间碎片和微流星体碰撞	23
1.3.22	环境概要	24
	参考文献	25
<b>第 2 章</b>	<b>激励预示分析</b>	<b>26</b>
2.1	低频瞬态激励	26
2.1.1	分析模型	27
2.1.2	外推法	28
2.1.3	直接测量法	29
2.1.4	评估	30
2.2	低频随机激励	30
2.2.1	分析模型法	30
2.2.2	缩比模型法	30
2.2.3	外推法	31
2.2.4	直接测量法	31
2.2.5	其他方法	31
2.2.6	评估	31

2.3 准周期激励	32
2.4 外部噪声激励	32
2.4.1 声功率法	32
2.4.2 声场缩比模型	35
2.4.3 外推法	36
2.4.4 直接测量法	37
2.4.5 评估	37
2.5 外部气动激励	38
2.5.1 边界层预测法	38
2.5.2 风洞缩比模型法	42
2.5.3 外推法	43
2.5.4 直接测量法	43
2.5.5 评估	44
2.6 内部噪声激励	44
2.6.1 模态分析法	45
2.6.2 统计能量分析法	45
2.6.3 动力学缩比模型	51
2.6.4 外推法	51
2.6.5 直接测量法	52
2.6.6 填充因子	52
2.6.7 泄压口噪声	53
2.6.8 机械振动辐射	54
2.6.9 评估	54
2.7 结构传播式振动激励	55
2.8 高频瞬态激励	56
参考文献	56
<b>第3章 响应预示分析</b>	<b>58</b>
3.1 低频振动和瞬态响应	58
3.1.1 结构动力学模型	60
3.1.2 经典正则模态分析方法	60
3.1.3 有限元建模方法	64

3.1.4	其他建模方法	66
3.1.5	模型验证	67
3.1.6	低频响应分析	70
3.1.7	组合低频响应	75
3.1.8	评估	77
3.2	高频振动响应	79
3.2.1	经典正交模态分析法	80
3.2.2	统计能量分析法	81
3.2.3	有限元法	88
3.2.4	外推法	89
3.2.5	直接测量法	92
3.2.6	评估	93
3.3	高频瞬态响应	93
3.3.1	分析模型法	93
3.3.2	经验模型法	94
3.3.3	统计能量分析法	95
3.3.4	外推法	98
3.3.5	直接测量法	101
3.3.6	评估	102
	参考文献	103
<b>第4章</b>	<b>最大预期环境计算</b>	<b>106</b>
4.1	空间差异——点预示方法	106
4.1.1	包络限	108
4.1.2	正态容差限	109
4.1.3	无分布容差限	113
4.1.4	经验容差限	114
4.1.5	正态预测限	116
4.1.6	评估	118
4.2	空间差异——区间预示方法	119
4.2.1	频率分辨率带宽的变化	120
4.2.2	结构区间的变化	121

4.3	多次飞行过程之间的差异 .....	122
4.4	容差限超过部分的选择 .....	123
4.5	输入运动限值的约束 .....	125
4.5.1	基本原理 .....	126
4.5.2	输入力控制技术 .....	127
4.5.3	输入加速度限制方法 .....	130
4.5.4	响应加速度限制方法 .....	132
4.5.5	噪声试验 .....	132
4.5.6	评估 .....	133
4.6	瞬态波形的重构 .....	134
	参考文献 .....	135
<b>第5章</b>	<b>环境持续时间的计算 .....</b>	<b>138</b>
5.1	失效模型 .....	139
5.1.1	逆幂律模型 .....	140
5.1.2	基于 S-N 曲线的疲劳损伤模型 .....	141
5.1.3	基于裂纹生长速率的疲劳损伤模型 .....	142
5.1.4	首次穿越模型 .....	144
5.1.5	评估 .....	147
5.2	短时噪声与振动载荷的持续时间 .....	147
5.2.1	近似流程 .....	147
5.2.2	数值计算流程 .....	149
5.2.3	多次飞行事件的过程 .....	150
5.2.4	评估 .....	151
5.3	长时间噪声与振动载荷的持续时间 .....	152
5.3.1	加速噪声与振动试验 .....	153
5.3.2	耐久性和功能性试验 .....	153
5.3.3	环境作用时间和设计准则 .....	154
	参考文献 .....	154
<b>第6章</b>	<b>设计与试验准则 .....</b>	<b>156</b>
6.1	概述 .....	156
6.2	低频振动和瞬态响应 .....	156

6.2.1	设计准则	157
6.2.2	方案和初样设计阶段	160
6.2.3	后期和最终设计	163
6.2.4	模态试验	164
6.2.5	试验准则	164
6.3	高频振动响应	165
6.3.1	初始设计	165
6.3.2	最终设计	170
6.3.3	设计与试验余量	171
6.4	高频瞬态响应	174
6.4.1	一般设计考虑	174
6.4.2	设计与试验余量	175
	参考文献	175
<b>第7章</b>	<b>试验总则</b>	<b>177</b>
7.1	试验目的	177
7.1.1	鉴定试验	177
7.1.2	验收试验	178
7.1.3	单件首飞试验	178
7.2	动力学激励事件	179
7.2.1	短时事件	179
7.2.2	长持续时间事件	180
7.3	装配层级	181
7.4	模拟类别	182
7.4.1	正弦扫描激励模拟瞬态激励	182
7.4.2	多轴激励	183
7.5	试验夹具	184
7.5.1	小型试件	184
7.5.2	大型试件	184
7.6	试验失效的判断	185
<b>第8章</b>	<b>试验设备与过程要求</b>	<b>187</b>
8.1	低频振动试验	187

---

8.1.1 试验设备 .....	187
8.1.2 试验程序 .....	190
8.2 低频瞬态试验 .....	192
8.2.1 试验设备 .....	192
8.2.2 试验程序 .....	193
8.2.3 替代程序 .....	194
8.3 高频振动试验 .....	195
8.3.1 试验设备 .....	195
8.3.2 试验程序 .....	196
8.4 高频瞬态试验 .....	196
8.4.1 试验设备 .....	196
8.4.2 试验程序 .....	199
8.5 声试验 .....	200
8.5.1 试验设备 .....	200
8.5.2 试验程序 .....	202
8.6 替代动力学试验 .....	203
8.6.1 联合动力学试验 .....	203
8.6.2 直接声场法声试验 .....	203
参考文献 .....	204

# 第 1 章 分类、描述和任务事件

卫星和运载火箭从研制、发射、在轨运行直至任务结束所经受的力学环境并不完全一致。由于研制流程或任务的不同,卫星所受力学环境的种类和特性也会存在一定的差别。例如,不同运输方式(汽车、火车、轮船和飞机)将使卫星承受不同的运输环境,返回式卫星因其返回地面,需要比非返回式卫星多承受返回气动力/热环境和着陆冲击环境等。总的来说,航天动力学环境的设计和过程应涵盖卫星和运载火箭从制造到任务终止的整个寿命周期,不可忽略任何一个环境,否则可能导致航天产品部组件的失效,甚至整个任务失败。本章介绍航天飞行器(运载器、上面级和航天器等)在其使用寿命周期内(从出厂到其完成飞行任务)所经历动力学环境的分类、描述和任务事件<sup>[1]</sup>。

## 1.1 动力学环境的分类

### 1.1.1 概述

航天动力学环境包括所有作用在航天器及其组件上的产生各种动激励的现象。动激励也称为“力函数”或“动载荷”。这些激励可以是施加的外力,也可以是一种运动输入,它们既可能由内部产生,也可能由外部诱发。

内部激励的示例如下:

- (1)转动部件的不平衡;
- (2)机构运行;
- (3)硬件装配的不对中;
- (4)组件中的磁力、气动力或流体动力;
- (5)贮箱内推进剂液体的晃动;
- (6)动力供给或需求不平衡造成的扭矩变化。

内部激励是和组件的特定设计以及其具体功能紧密联系的,本书中的方法可能无法轻易地解决内部激励的问题,但不能忽视内部激励的重要性。

外部激励的示例如下：

- (1) 装卸；
- (2) 运输；
- (3) 发射；
- (4) 上升；
- (5) 空间运行；
- (6) 进入行星(包括地球)大气及着陆。

为了便于数据分析及简化试验流程,一般将动力学环境分为确定性的、随机性的或两者皆有的,也可以根据动力学环境的特点将其分为稳态、非稳态和瞬态。

### 1.1.2 确定性动力学环境

确定性动力学环境是指每当处于此环境条件时,能够产生具有相同时间历程的激励。也就是说,在任意时刻  $t$ ,在允许的试验误差范围内,激励的瞬时值都可以通过前一时间对激励的测量值来确定。确定性动力学环境通常是比较易于理解、易于描述的物理过程。常使用确定性方法来描述和预示这些激励以及由这种环境因素产生的响应。

因此,可以在数学上将确定性环境因素描述为一个时间的函数  $x(t)$ ,它是一个周期或非周期(瞬态)的时间历程信号,如图 1.1 所示。此外,可以用函数  $x(t)$  的傅里叶变换  $X(f)$  来描述确定性动力学环境在频域上的表现。

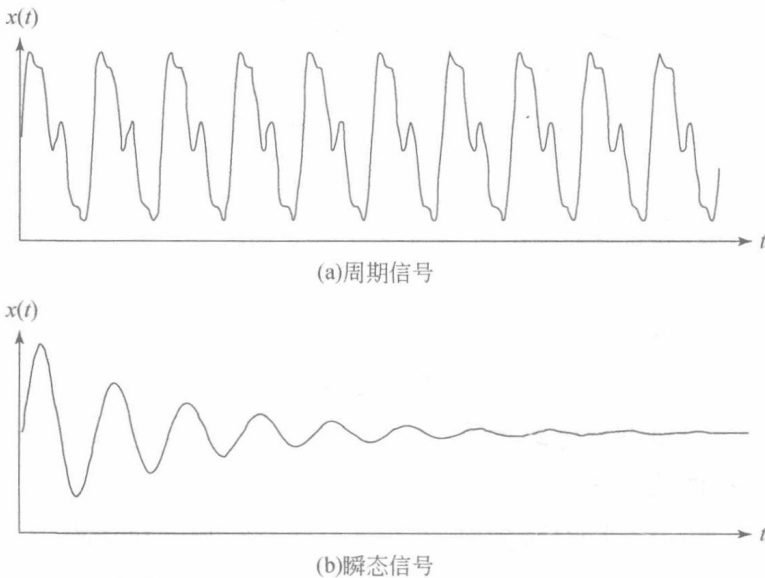


图 1.1 周期信号和瞬态信号图示

### 1.1.3 随机动力学环境

随机动力学环境是指每当处于此环境条件时,用来描述环境因素的时间历程信号的统计学特征(如均值和标准偏差)是不变的,而特定时刻的信号值是变换的。因此,在特定时刻  $t$ , 信号值无法通过前一环境因素的测量值获得,如管中高速气流产生的气动噪声。一般来说,动力学环境通常是由确定性部分和随机部分组成。图 1.2(a)是纯随机环境产生的随机信号示例。图 1.2(b)是周期(确定性的)与随机环境因素共同作用而产生的信号示例,该信号中的周期性部分如图 1.1(a)所示。

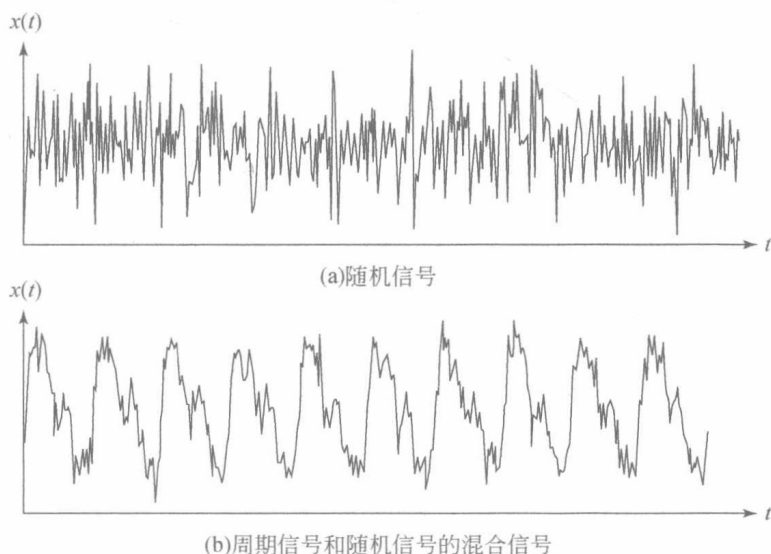


图 1.2 随机信号和周期-随机混合信号(或称确定-随机混合信号)

随机动力学环境称为“时不变”还是“时变”取决于在所关心的时间范围内,表现环境特性全部时间历程信号的统计学特征值是随时间不变的还是变化的。“时不变”随机信号通常称为“平稳随机信号”。平稳随机信号又可分为各态历经随机和非各态历经随机。如果各样本函数的时间平均统计特性都相等,那么称此环境为各态历经随机的。

当一个或多个表现环境特性的随机信号的统计学特征值随时间变化时,该环境称为“时变”的。航天器在发射阶段经历的大多数动力学环境都是“时变的”。综合数据分析与工程应用的观点来看,可将随机时变环境划分为两类,即非平稳随机和瞬态随机。如果表现环境特性的随机信号中至少有一个统计学

属性随时间变化,那么称这种随机环境为非平稳的。例如,航天器在大气层中上升时造成的气动噪声,它的均方根值是时变的。如果表现环境特性的随机信号有明确的开始和结束,并且其作用时间相对瞬态环境作用下结构的脉冲响应函数衰减时间较短,就称为瞬态动力学环境。例如,火箭发动机点火瞬时超压,或是爆炸分离冲击事件。图 1.3 是典型的非平稳和瞬态随机动力学环境特征信号图示。

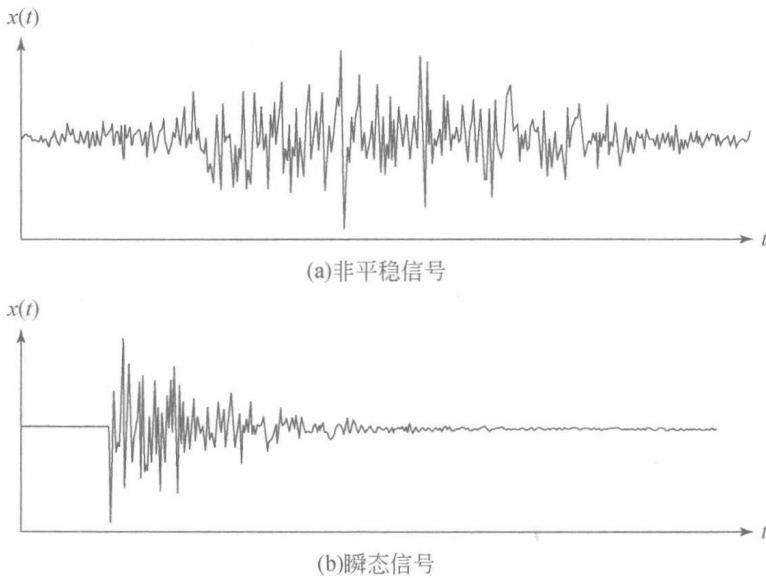


图 1.3 非平稳和瞬态随机信号图示

## 1.2 动力学环境描述

### 1.2.1 概述

有多种方式描述动力学环境信号  $x(t)$ 。这里使用的描述符包括时间历程,均值,平稳过程的线谱、自谱、波数谱、1/3 倍频程谱,非平稳过程的最大谱,以及瞬态过程的傅氏谱、能量谱、冲击响应谱。

$x(t)$ 和  $y(t)$ 分别表示两个不同环境的信号,或者同一环境和测量时间但不同位置的测量信号,一般用互功率谱及其衍生的函数(相干函数、频率响应函数、脉冲响应函数)来确定其线性关系。除了时间历程、1/3 倍频程谱和冲击响应谱,所有这些描述符都包含对信号  $x(t)$ 和  $y(t)$ 的傅里叶变换,定义如下:

$$\begin{cases} X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt \\ Y(f, T) = \int_0^T y(t) e^{-j2\pi ft} dt \end{cases} \quad (1.1)$$

如果  $x(t)$  和  $y(t)$  的幅值单位是对应时域(s)的  $u$  和  $v$  (如  $g$ 、 $m$ 、 $Pa$  等), 则  $X(f, T)$  和  $Y(f, T)$  的幅值单位是对应频域(Hz)的  $U$  和  $V$ 。

为了清楚, 本书中所有公式都是连续的时域和频域函数。然而, 在实际应用中都是用计算机进行分析计算的, 所有数据都是离散时域和离散频域的函数。

### 1.2.2 时间历程

具有确定性特性的低频(50Hz 以下)瞬态环境, 环境采样时间历程(图 1.1)可以为预示结构响应、设计标准、确定试验量级等提供充分描述。但是, 采样时间历程对随机环境和确定性高频环境的工程应用来说是不能描述清楚的。

### 1.2.3 均值

对于稳态或平稳动力学环境, 用信号  $x(t)$  来表示时, 对环境幅值最简单的描述方法是: 用均值  $\mu_x$  描述  $x(t)$  的集中趋势; 用标准差  $\sigma_x$  描述  $x(t)$  的离散情况; 用均方根  $\psi_x$  描述集中趋势和离散情况。信号  $x(t)$  的均值、标准差和均方根的计算见式(1.2)~式(1.4), 其中  $0 \leq t \leq T$ 。

(1) 均值:

$$\mu_x = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (1.2)$$

(2) 标准差:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x]^2 dt} \quad (1.3)$$

(3) 均方根值:

$$\psi_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (1.4)$$

式中,  $T$  为线性平均时间。需要注意的是, 高频动力学环境的测量一般使用压电传感器, 这种传感器无法测量信号的平均值, 也就是说实测信号没有直流(DC)部分。在这种情况下, 均方根与标准差相等, 也就是如果  $\mu_x = 0$ , 则  $\psi_x = \sigma_x$ 。