



普通高校“十三五”规划教材

振动、冲击环境与试验

ZHENDONG CHONGJI HUANJING
YU SHIYAN

袁宏杰 姚 军 李志强 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高校“十三五”规划教材

振动、冲击环境与试验

袁宏杰 姚 军 李志强 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书结合国内可靠性与环境工程的实践经验,从工程角度出发,对振动、冲击环境与试验技术的理论、方法和应用进行了系统的整理和编写。

全书共分9章,从产品环境工程的角度,描述了产品的振动、冲击环境,讲述了振动系统的响应、振动与冲击环境对产品的损伤机理和产品的失效模式、环境数据处理归纳的方法、如何制定振动环境试验条件以及振动与冲击环境适应性设计等。

本书可作为高等院校本科生、研究生专业课的教材,也可供从事可靠性试验、环境试验及相关研究的设计及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

振动、冲击环境与试验 / 袁宏杰,姚军,李志强编

著. -- 北京:北京航空航天大学出版社,2017.3

ISBN 978-7-5124-0854-8

I. ①振… II. ①袁… ②姚… ③李… III. ①机械工程—研究 IV. ①TH

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第002930号

版权所有,侵权必究。

振动、冲击环境与试验

袁宏杰 姚 军 李志强 编著

责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京九州迅驰传媒文化有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:13.25 字数:339千字

2017年5月第1版 2017年5月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-5124-0854-8 定价:39.00元

前 言

振动、冲击是导致产品失效的主要环境因素之一,许多机载、弹载设备的故障和飞行事故都与振动、冲击环境有关,例如航空涡轮发动机使用中的故障有40%与振动有关,导弹飞行中所有故障约有一半是振动造成的。为保证产品的可靠性和环境适应性,重要产品和部件都要求进行振动、冲击环境试验和适应性设计。

目前,国内有不少机械振动方面的书籍,但大多偏重于基础理论和振动测试,较少介绍振动、冲击环境与试验。而在工程实际中,为提高产品的可靠性、环境适应性,需要在设计阶段对产品振动环境适应性进行设计;为考核产品的抗振功能和耐振强度,必须进行振动试验。为此,我们本着紧密结合工程实际的原则,结合多年从事环境工程教学与科研实践的心得,编写了此书。

本书力图从产品环境工程的角度,对产品振动、冲击环境进行描述,介绍振动系统的响应,振动、冲击环境对产品的损伤机理和产品的失效模式,环境数据处理、归纳的方法,如何制定振动环境试验条件,以及振动、冲击环境适应性设计等。

本书共分9章。第1章为绪论。第2章主要介绍周期振动、非周期振动、随机振动的时域、频域特性。第3章介绍单自由度系统、二自由度系统的响应。第4章介绍振动测量设备原理及选型、振动环境数据处理分析的方法。第5章介绍振动的破坏模型、试验条件设计的理论和方法。第6章介绍实验室振动试验方法。第7章介绍模态测量和模态辨识方法。第8章主要介绍振动环境适应性设计。第9章介绍冲击环境及试验方法。

本书第1~2章、第4~6章、第9章由袁宏杰编写,第3章、第8章由姚军编写,第7章由李志强编写。全书由袁宏杰统稿。在编写过程中,参考了大量国内外文献,已在书后的参考文献中列出,在此对这些文献的作者一并表示感谢。

本书可供高等院校的本科生和研究生学习使用,也可供工程技术人员学习与参考。由于作者水平有限,对于书中的错误和疏漏之处,恳请读者谅解和指正。

作 者

2017年1月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 振动、冲击环境与试验的目的	1
1.2 振动、冲击环境与试验的内容	1
1.3 发展与展望	4
第 2 章 振动环境描述	5
2.1 概 述	5
2.2 周期振动	6
2.2.1 正弦振动	6
2.2.2 复杂周期振动	7
2.3 非周期振动	10
2.3.1 准周期振动	10
2.3.2 瞬态振动	11
2.4 随机振动的基本特性	12
2.4.1 平稳的随机振动	13
2.4.2 随机振动基本统计特性描述	14
2.5 自相关函数和互相关函数	17
2.5.1 相关的概念	17
2.5.2 自相关函数	18
2.5.3 互相关函数	20
2.6 自功率谱密度与互功率谱密度	22
2.6.1 自功率谱密度的定义与性质	22
2.6.2 自功率谱密度与自相关函数的关系	23
2.6.3 互功率谱密度	25
2.6.4 相干函数	27
2.7 自功率谱密度的统计误差及概率分布	27
2.7.1 自功率谱密度的统计误差	27
2.7.2 自功率谱密度的概率分布	29
习 题	33
第 3 章 振动系统响应	34
3.1 振动系统分类及描述	34
3.1.1 振动系统分类	34



3.1.2	振动形式分类	35
3.1.3	研究方法	36
3.2	单自由度线性系统振动	37
3.2.1	单自由度系统振动方程	37
3.2.2	单自由度无阻尼系统的自由振动	37
3.2.3	单自由度有阻尼系统的自由振动	39
3.2.4	单自由度系统定常强迫振动	43
3.2.5	单自由度系统频率响应函数	45
3.3	集中参数系统的振动	46
3.3.1	二自由度系统微分方程	47
3.3.2	实模态分析	48
3.3.3	固有振型的正交性、展开定理	50
3.3.4	自由振动分析	51
3.3.5	受迫振动分析	52
	习 题	53
第 4 章	振动环境数据采集与分析	54
4.1	概 述	54
4.2	振动传感器	55
4.2.1	惯性式传感器接收原理	55
4.2.2	压电式加速度传感器	59
4.2.3	压阻式加速度传感器	60
4.2.4	伺服式加速度传感器	62
4.2.5	相对式传感器	63
4.3	传感器的选择和使用	64
4.3.1	传感器的主要性能参数	64
4.3.2	传感器的安装	65
4.4	放大器	66
4.4.1	电压放大器	66
4.4.2	电荷放大器	69
4.5	滤波器	70
4.5.1	低通滤波器	70
4.5.2	高通滤波器	71
4.5.3	带通滤波器和带阻滤波器	71
4.6	离散与量化	72
4.7	测量规划	73
4.8	数据预处理	75
4.8.1	不合理点辨识及剔除	75
4.8.2	虚假趋势辨识及处理	76



4.8.3	信号削波辨识及处理	78
4.8.4	过大噪声辨识及处理	78
4.8.5	信号丢失辨识及处理	78
4.9	数据分离和检验	79
4.9.1	周期性检验与分离	79
4.9.2	平稳性检验	81
4.9.3	正态性检验	83
4.10	数字分析基础	84
4.10.1	采样和频率混叠	84
4.10.2	有限长度的影响	86
4.11	随机振动统计量的数字分析	89
4.11.1	均值、方差和均方值分析	89
4.11.2	概率密度函数分析	89
4.11.3	自相关函数分析	90
4.11.4	离散傅里叶变换	90
4.11.5	自功率谱密度分析	91
	习 题	92
第 5 章 振动破坏与试验条件		93
5.1	概 述	93
5.2	峰值破坏	94
5.2.1	穿越分析	94
5.2.2	窄带响应的峰值概率密度	95
5.2.3	峰值破坏模型	98
5.2.4	随机振动与正弦振动的峰值等效关系	99
5.3	疲劳破坏	100
5.3.1	敏纳线性累积损伤模型	100
5.3.2	应力与寿命的关系	101
5.3.3	振动疲劳破坏	102
5.3.4	正弦振动与随机振动的疲劳等效关系	102
5.4	功能试验条件编制	104
5.4.1	作图包线法	104
5.4.2	区间估计包线法	105
5.4.3	正态单边容差上限法	106
5.5	耐久试验条件	109
5.5.1	状态包线法	110
5.5.2	状态区域数据归纳法	110
5.6	振动环境预估	111
5.6.1	经验回归公式法	112



5.6.2 相似型号外推法	115
5.6.3 有限元法	116
5.6.4 统计能量法	116
习 题	117
第 6 章 振动环境试验	118
6.1 概 述	118
6.2 振动环境模拟	118
6.3 正弦振动试验	121
6.3.1 定频试验	121
6.3.2 扫频试验	122
6.4 随机振动试验	125
6.4.1 随机振动均方根值计算	125
6.4.2 随机振动控制	127
6.5 试验设备	129
6.5.1 电动振动台	130
6.5.2 功率放大器	133
6.5.3 夹 具	135
6.6 振动环境试验实施	137
习 题	139
第 7 章 模态试验分析	141
7.1 概 述	141
7.2 模态测试技术	142
7.2.1 测试系统的组成	142
7.2.2 试件安装方法	144
7.2.3 激励方式	145
7.2.4 激励点与测试点的选择	150
7.2.5 测试精度的保证	153
7.3 模态参数识别技术	154
7.3.1 分量分析法	156
7.3.2 导纳圆辨识法	158
习 题	162
第 8 章 振动环境适应性设计	163
8.1 振动的危害及有关标准	163
8.1.1 振动对人员舒适性与健康的危害及相关标准	163
8.1.2 振动对仪器设备的危害及相关标准	164
8.1.3 振动对结构的振动强度与振动耐久性的危害及相关标准	165



8.1.4 振动对设备及结构系统的可靠性的危害及相关标准	165
8.2 振动控制技术的主要类型	165
8.2.1 隔振与减振	165
8.2.2 阻尼材料附加减振和阻尼结构	170
8.2.3 动力吸振	172
8.2.4 结构动力学设计和主动振动控制技术	176
8.3 航空、军工产品对减振的特殊要求	178
8.3.1 引 言	178
8.3.2 航空产品对减振器的特殊要求	178
8.3.3 航炮的振动分析	179
习 题	180
第 9 章 冲击响应谱与冲击试验	181
9.1 冲击环境	181
9.1.1 半正弦冲击波形	182
9.1.2 后峰锯齿冲击波形	183
9.2 冲击环境测量	184
9.3 经典冲击波形试验	187
9.4 冲击响应谱	190
9.4.1 冲击失效机理	190
9.4.2 冲击响应谱	191
9.4.3 冲击响应谱与傅里叶谱的关系	194
9.4.4 冲击响应谱的数字算法	194
9.5 冲击响应谱应用与试验	196
9.5.1 冲击波形的等效	196
9.5.2 冲击响应谱匹配	198
习 题	199
参考文献	201

第1章 绪论

1.1 振动、冲击环境与试验的目的

振动是自然界最普遍的现象之一。人们的生活离不开振动,生活中不能没有声音和音乐,而声音的产生、传播和接收离不开振动;心脏的搏动、耳膜和声带的振动也是人体不可缺少的。在工程技术领域,振动现象也比比皆是,例如,桥梁和建筑物在阵风或地震激励下的振动,飞机和船舶在航行中的振动,机床和刀具在加工时的振动,各种动力机械的振动,控制系统中的自激振动等。

振动和冲击问题是工程中经常遇到的问题。许多设备的故障都与振动、冲击环境有关,例如航空涡轮发动机使用中的故障有40%与振动有关,导弹飞行中所有故障约有一半是振动造成的。振动导致的故障模式主要有:

- ① 产品的结构完整性破坏,如承载的结构动力失稳、疲劳断裂、机械磨损、密封泄漏等;
- ② 产品功能性故障,如设备失灵、性能下降或超差,执行机构卡死,继电器误动作等;
- ③ 产品工艺性故障,如连接松动,元器件相互摩擦、碰撞,电路板开路或短路等。

另外,强烈的振动和冲击环境也对人体有害。例如,当车辆的随机振动在30 Hz左右时,人体的腹腔会发生共振,造成呕吐。振动又是噪声的主要来源,使人不能正常工作,危及人类健康。

但振动也可利用,如振动传输、振动筛选、振动研磨、振动抛光、振动沉桩、振动消除内应力等。

研究振动、冲击环境与试验的目的就是掌握振动与冲击的规律与特性,制定试验条件,进行振动、冲击试验,防止各种振动、冲击对设备及结构造成的危害,确保设备的安全可靠运行。

1.2 振动、冲击环境与试验的内容

振动是机械系统在其平衡位置附近的往复运动。冲击是系统受到瞬态激励,其力、位移、速度或加速度发生突然变化的现象。

为研究与认识振动、冲击,首先必须区分其不同类别,掌握表征各类振动的描述方法。振动分为确定性振动和随机振动。确定性振动包括周期振动和非周期振动。

对于确定性的振动、冲击等动态信号,所测量的时间历程中计算的有效值、峰值等信息仅反映了其大小,不能反映振动的快慢等动态特征,需要将测量的随时间域变化的信号转变为频率域中的幅值分布。

随机振动是一种非周期的、不可重复的振动,不能用精确的数学表达式描述,只能用统计的方法来描述。对于随机振动,单个的样本不能反映随机振动的全部频域特征,需要对相关函数进行傅里叶变换,得到频率域中的有效值或均方值分布,即转换为随机振动的自功率谱密度



进行分析。

理论上,一个随机振动有着无限多个样本,而实际上,只能对有限几个样本进行测量分析,有限的样本必然会带来误差。对于随机过程是各态历经的情况,按理说它的一个样本就足以代表该过程的无限样本集合,但对于各态历经过程,只有在平均时间为无限大时,单个样本的时间平均特性才等同于其集合平均特性。由于我们只能分析有限长度的样本,所以仍然会带来误差。因此,需要对随机振动的自功率密度误差进行分析,采取平均等手段降低分析误差。

产品受振动作用产生振动响应,响应的大小取决于激励的大小和产品本身的特性。为研究产品的振动特性,需要利用力学原理建立产品的动力学模型。研究产品的振动特性所采用的这类模型,称为振动系统。振动系统由质量、阻尼、弹性系数等物理量组成。振动系统具有一定的质量,所以运动时具有动能;振动系统具有一定的弹性,所以运动时具有势能,两种能量不断转换。实际的系统还存在一定的阻尼,使振动衰减。

最简单的振动系统是只有一个质量的弹簧,称为单自由度系统,在受初始扰动后,质量将在平衡位置往复运动,无阻尼时,运动的位移、速度、加速度等物理量按正弦规律变化,称为简谐振动或正弦振动,振动的频率取决于系统的质量和弹性系数等固有特性。若系统是由多个集中质量组成的多自由度系统,则其固有频率也有多个,对某一特定的固有频率,系统的各集中质量按一定的振型进行振动。振型由系统的固有特性确定。固有振型与固有频率称为系统的固有模态。

根据激励信号与振动系统的响应信号,便可计算振动系统的固有频率、振型、模态质量和模态阻尼等模态参数,以及弹性模量、弹簧刚度等物理参数。具体的分析方法可分为时域法、频域法等。时域法直接将时域响应用计算机处理,得到模态参数。频域法根据频率响应函数矩阵,由模态分析软件对数据拟合,得到模态参数。各种方法各有优缺点,本书主要介绍频域法。

基于振动失效模式的破坏特征,在振动系统响应的基础上人们提出了振动破坏模型,用于指导工程应用。这些破坏模型主要集中于疲劳累积损伤破坏和峰值破坏两类假设。产品受振动作用时,振动的量值若超过设备的极限耐振动值,则将导致设备破坏,称为峰值破坏。峰值破坏模型主要针对功能故障模式。若设备长期受振动或冲击作用,则产生的破坏称为疲劳损坏。疲劳损坏模型主要针对耐久故障模式。

为研究振动系统的特性,考核产品承受振动和冲击的能力,制定试验室振动试验条件,振动环境的测量是必不可少的手段。

为适应各种场合振动测量的需要,研究人员研制了各种原理的振动传感器,如压电式传感器、压阻式传感器、伺服式传感器、电涡流式传感器等。目前,应用最广泛的是利用惯性原理的绝对式压电加速度传感器,它利用质量块、弹簧组成的单自由度系统对外界振动频率响应的平直段来进行测量。

振动测量属于动态测量的范围。为增加信噪比,提高抗干扰的能力,减少随机误差,动态测量需将传感器测量的电信号经过放大、滤波等失调环节作适当调节,对测量结果进行显示、分析。

模拟式分析存在分析速度慢、精度低、分辨率不高等问题。建立在快速傅里叶变换基础上的数字信号分析方法,得到了迅速的发展和广泛的应用。由于工程中的振动、冲击等物理量是随时间连续变化的,使用计算机处理需要将模拟信号转变为数字信号。将连续的随时间变化



的信号转变为离散的数字信号的过程称为采样。时域采样将产生频率混叠的问题,为避免混叠,需在采样前增加低通滤波器。

对振动环境的数字信号,为消除噪声干扰以及动态范围和分辨率不够等因素的影响,需进行数据预处理、数据检验与分离等工作。

为考核在最恶劣的振动环境应力作用下设备的工作状态或输入/输出特性是否发生不允许的变化,以及各构件的连接、固定、安装、变形及间隙限制之类的工艺要求是否受到破坏,通常在试验室要进行振动功能试验,振动功能试验按峰值破坏模型处理。

为确保设备在整个寿命期的结构完整性和功能、性能不发生不允许的变化,要在试验室进行振动耐久试验,耐久试验按疲劳损坏模型处理。

将实测的振动环境数据转换为振动环境条件还需要做很多工作,原因是实测数据在产品寿命期的不同阶段可能是多种多样的,而作为产品设计和试验依据的环境条件要求相对简单和统一。这些工作主要集中于两个方面:一方面是如何对多次测量的数据进行归纳处理,目前,主要采用统计归纳的方法,即给出一定置信度下环境的上限;另一方面是如何将寿命期内各种差异显著的振动环境数据统一成少数几种典型的环境条件。

当有大量可用的实测环境数据时,依据统计归纳方法所确定的环境条件最能符合实际情况。但工程上需要在实测环境数据很少甚至根本没有的情况下制定环境条件。如飞机等需要研制生产出来并经过多次飞行试验后才能得到可供统计分析的大量实测环境数据,而飞机研制总要求在设计之前提供环境条件,用于在研制中进行相应的设计和试验考核,以保证飞行试验的成功。因此,确定振动环境条件本身的需要和产品研制对振动环境条件的需求往往是矛盾的。在这种情况下,环境预估技术是解决问题的必然选择,而预估的准确性将直接影响环境条件制定的合理性。振动环境预估目前主要有两类方法:一类是相似产品外推方法,另一类是计算分析方法。

振动环境试验是从简单到复杂慢慢发展起来的。为验证产品实际振动环境的适应性,早期的振动试验只能把试件放在实际情况下去考核,例如汽车的跑车试验。

由于汽车工业、航空工业的发展,振动问题越来越复杂,单纯的外场振动试验已不能满足要求,随着振动试验技术的进步,产生了电动振动台,在试验室进行正弦振动试验得到了广泛的应用。高速飞行的飞机、火箭产生的随机振动环境更为复杂、严酷。20世纪80年代,随机振动、随机加正弦等混合型振动都已在试验室实现。随着振动试验技术的发展,多点同步或非同步振动的多轴试验系统和控制系统也得到了工程应用。

产品对振动环境的适应性是产品在寿命期内预计在可能遇到的振动环境作用下能实现其功能和性能不被破坏的能力,是通过设计过程反映于产品之中的一种固有的质量特性。振动环境适应性设计主要包括两方面的技术:一方面是振动环境加固设计,即增强产品自身的抗振能力;另一方面是振动环境控制设计,即通过各种缓冲减振措施降低产品经受的振动环境量级。

冲击的特点是持续时间短、量值大。冲击响应就是系统受到短暂的瞬态的非周期激励下的响应。对于工程实际问题,由于冲击带来的严重破坏性,对冲击的研究引起了人们的重视。本书介绍了试验中经常用到的半正弦、后峰锯齿波等几种经典冲击波形的频域特征及试验方法。由于产品所承受的冲击实际上是一种复杂的瞬态振动,因此规定的半正弦波、后峰锯齿波在实际中不可能模拟实际复杂的冲击振动环境。而冲击响应谱是响应等效,对产品的效应也



等效,试验效果比较接近实际使用环境,在试验中能充分暴露冲击环境造成的故障,冲击响应谱试验方法是本书重点介绍的内容之一。

以上是振动、冲击环境与试验的主要内容。

1.3 发展与展望

振动与冲击是一门古老而又年轻的学科。目前,工程上对振动环境的处理大都假设其为平稳的,但很多振动环境数据是非平稳的,对于这些信号的处理,尽管人们提出了一些近似方法,但与实际需要还存在相当大的差距。近年来,有些研究人员已经探索将现代谱分析、小波分析等新技术应用于这类信号的处理中,并取得了一定的进展,但离实用还有很大的距离。

对于振动环境预示,主要有预示低频环境的有限元方法、预示中频环境的波传导方法和预示高频环境的统计能量方法,其最大的特点是能够得到详细的环境参数,并便于与设计过程相结合以考虑各种设计参数变化的影响,从而实现动态设计。采用这些方法的一个重要前提条件是获得振源所产生的动载荷,而如何获得准确的动载荷数据目前还没有很好的解决办法,在一定程度上影响了这些方法的使用。

振动与冲击试验技术的发展必须紧紧依靠物理学的最新成果。许多新的试验方法、试验技术、测量元件都是利用了物理学的新成果,如激光非接触式振动测量、超声发生器以及新型传感器。

振动适应性设计是一个动力学特性的优化设计过程。基于线性动力分析的结构动态优化设计技术已经在响应控制设计中得到应用,但工程实践中往往需要采用非线性器件以提高振动响应控制的效果。目前对非线性环节的处理大多采用描述函数等工具分析其基波行为,尚很少能够采用非线性动力分析方法进行振动环境控制设计。发展针对非线性问题的动力学设计方法和软件将是今后振动环境控制技术研究的重点课题。

产品实际使用过程往往同时存在振动、温度、湿度等多种因素的作用,其联合作用的结果可能加速产品的失效,因此,同时考虑多种环境因素的综合环境试验技术在近年来得到广泛应用,特别是在产品可靠性增强方面发挥了重要的作用。综合环境试验是国际上振动环境工程的重要发展方向,但目前在综合环境模拟的基础理论方面的研究工作却远远滞后于应用的发展。为了适应这一发展趋势,除了研制综合环境试验设备以外,加强相关的模拟试验理论的研究与发展工作是必要的。

第 2 章 振动环境描述

2.1 概 述

振动的大小可用如位移、速度、加速度等物理量描述,以时间为横坐标,以加速度等物理量的瞬时值为纵坐标,可得到振动的时域波形图。

为研究振动,首先必须区分振动的不同类别,掌握表征各类振动的描述方法。根据振动随时间变化的规律,将振动环境分为下面两类进行研究。

图 2-1 给出了振动的分类。

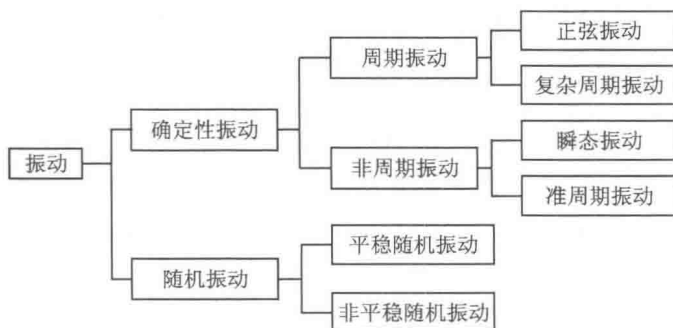


图 2-1 振动的分类

1. 确定性振动

确定性振动包括周期振动和非周期振动,周期振动分为正弦振动和复杂周期振动。

在发动机和往复运动机械附近安装的产品受到的振动一般是周期性的。产品的工作环境也可能受到两个或两个以上的振源的影响,这些振源可能是周期性的振动,如安装在具有两台电机同时工作的海洋采油平台上的设备受到的振动就主要是两个周期性的振动。

对于复杂周期振动,可分解为多个正弦振动的叠加,数学上称为傅里叶级数。以频率为横坐标,以振动各频率分量的幅值和相位为纵坐标,可以得到振动幅值谱和相位谱。复杂周期振动的幅值谱和相位谱是离散的。

对于非周期的确定性振动,可通过傅里叶变换,得到振动的幅值谱和相位谱,非周期振动的频谱是连续的。

2. 随机振动

随机振动是一种非周期的、不可重复的振动,不能用精确的数学表达式描述,只能用统计的方法来描述。

产品在运输过程中会受到随机振动,如汽车、火车在行驶时的振动,这种振动一般为随机振动;也可能会受到随机振动和周期振动共同组成的振动,如安装在螺旋桨式飞机上某部位的设备,一方面会受到螺旋桨产生的周期振动,另一方面又会受到飞机表面附面层气流引起的随



机振动。

分析随机振动之所以成为可能,是因为随机振动呈现出一定程度的统计规律性,通常认为工程上大多数随机振动经过分段等处理后是平稳的,即随机振动的统计特征与时间无关。

随机振动可以从时域、幅值域的概率密度、均方值、时差域的自相关函数、频率域的自功率谱密度等不同角度进行描述。时域、幅值域都没有给出振动的频率信息,而随机振动的自功率谱密度给出了振动的均方值在频域的分布,包含了随机振动的大小、快慢等信息,这对系统的响应、振动破坏以及确定试验条件都非常重要。

2.2 周期振动

2.2.1 正弦振动

当振动的物理量随时间的变化规律可用正弦或余弦数学关系式描述时,称之为正弦振动。

假设正弦振动 $D(t)$ 的最大位移为 D_{\max} 、角频率为 ω_0 、初始相位角为 φ ,则正弦振动的表达式为

$$D(t) = D_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (2-1)$$

一次振动循环所需的时间 T 称为周期,单位时间内振动循环的次数 f 称为振动的频率。正弦振动的周期、频率、角频率的关系为

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (2-2)$$

式中,周期 T 的单位为秒(s),频率 f 的单位为赫兹(Hz),角频率 ω_0 的单位为弧度/秒(rad/s)。

根据正弦振动位移的表达式,可得到正弦振动速度 $V(t)$ 、加速度 $A(t)$ 的表达式:

$$V(t) = \omega_0 D_{\max} \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (2-3)$$

$$A(t) = -\omega_0^2 D_{\max} \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (2-4)$$

正弦振动的特点是位移、速度、加速度随时间变化的规律都是同频率的正弦振动,速度的相位较位移的相位超前 90° ,加速度的相位较速度的相位超前 90° 。

正弦振动的最大位移 D_{\max} 、最大速度 V_{\max} 、最大加速度 A_{\max} 的关系为

$$V_{\max} = \omega_0 D_{\max} \quad (2-5)$$

$$A_{\max} = \omega_0^2 D_{\max} \quad (2-6)$$

在振动测量与试验中,位移的常用单位为毫米(mm)或微米(μm),速度的单位为米/秒(m/s)或毫米/秒(mm/s),加速度的单位为米每二次方秒(m/s^2)或用重力加速度 g 表示, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

例 2.1 设正弦振动的最大位移为 2.5 mm,当频率分别为 5 Hz、10 Hz 时,求振动的最大加速度。

解: 当正弦频率为 5 Hz 时,最大加速度为

$$A_{\max} = D_{\max} (2\pi f)^2 = \frac{2.5}{1000} (2\pi \times 5)^2 \text{ m/s}^2 = 2.4 \text{ m/s}^2$$

当正弦频率为 10 Hz 时,最大加速度为



$$A_{\max} = D_{\max} (2\pi f)^2 = \frac{2.5}{1000} (2\pi \times 10)^2 \text{ m/s}^2 = 9.9 \text{ m/s}^2$$

从例 2.1 可以看出:如果正弦振动的最大位移不变,则随着频率的提高,最大加速度会增大。如果正弦振动的最大加速度不变,则随着频率的提高,最大位移会减小。对于低频振动,即使位移很大,加速度仍可能很小;对于高频振动,虽然位移很小,但加速度可能很大。因此在振动测量中,为提高测量的信噪比,对低频振动常采用位移或速度作为测量的物理量,对高频振动常选用加速度作为测量的物理量。

图 2-2 给出了正弦周期振动的时域和频域图。在频域图上正弦振动只在频率 ω_0 处有能量。

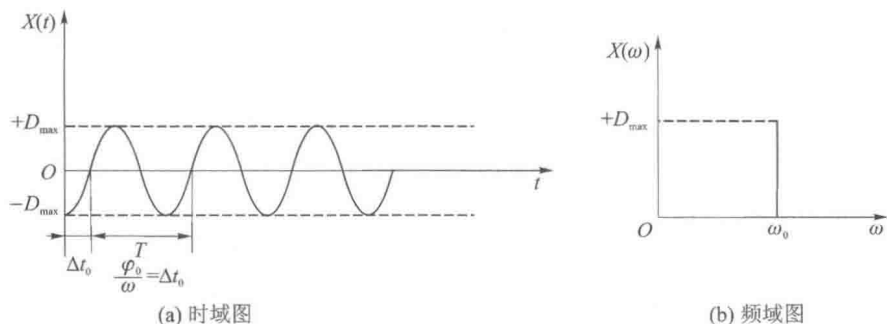


图 2-2 正弦周期振动时域和频域图

2.2.2 复杂周期振动

1. 复杂周期振动的时域描述

复杂周期振动的时域波形可以表示为

$$X(t) = X(t \pm KT), \quad K = 1, 2, 3, \dots \quad (2-7)$$

式中, T 为周期, K 为正整数。

周期振动时域波形的特征可由下列参数描述:

峰值 X_{\max} , 时域波形上相对于零线的最大偏离值。

有效值 X_{rms} , 也称均方根值, 表示为

$$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} \quad (2-8)$$

平均绝对值 X_{av} , 表示一个周期内波形与零线包围面积的绝对值对时间的平均值, 定义为

$$X_{\text{av}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |X(t)| dt} \quad (2-9)$$

除了周期、峰值、有效值、平均绝对值外, 波形系数 F_f 和波峰系数 F_c 也是描述周期振动的特征参量。波形系数和波峰系数分别为

$$F_f = \frac{X_{\text{rms}}}{X_{\text{av}}} \quad (2-10)$$

$$F_c = \frac{X_{\max}}{X_{\text{rms}}} \quad (2-11)$$



2. 复杂周期振动的频域描述

数学上,周期函数可展开为傅里叶三角级数。因此,任何周期振动都可分解成一系列正弦振动之和,其中最低的正弦频率为 $\frac{1}{T}$,称为基频,而其余正弦成分称为谐波,它们对应的频率为基频的整数倍,各谐波的幅值由傅里叶级数的系数确定。

周期函数 $X(t)$ 可用傅里叶级数表示为

$$X(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t), \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2-12)$$

式中

$$\omega_k = \frac{2\pi}{T}k, \quad a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X(t) dt, \quad a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X(t) \cos(\omega_k t) dt$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X(t) \sin(\omega_k t) dt$$

式(2-12)也可写成

$$X(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin(\omega_k t + \varphi_k) \quad (2-13)$$

式中

$$c_0 = a_0, \quad c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \varphi_k = \arctan \frac{b_k}{a_k}$$

以频率 f 为横坐标,以基波、高次谐波的幅值 c_k 为纵坐标,得到的曲线称为幅频谱;以频率为横坐标,以相位为纵坐标,得到的曲线称为相位谱,统称为傅里叶频谱。

周期振动可看作由频率分量依次为基频 $\frac{1}{T}$ 及其整数倍的若干或无数个正弦振动分量的合成振动。这些分量依据 $k=1, 2, 3, \dots$ 分别称为基频分量、二倍频分量、三倍频分量等。基频分量有时称为基波, k 倍分量则称为 k 倍谐波。

周期振动的频谱由若干沿频率轴离散分布的谱线组成。周期振动在频域上是离散的,相邻的谱线间隔相等,等于基频 $\frac{1}{T}$ 。周期信号的频谱表示了信号的组成以及每个正弦信号的大小。例如对周期为 100 ms 的信号,其包含的频率成分为 10 Hz 的整数倍,即 10 Hz、20 Hz、30 Hz、 \dots 、 $10k$ Hz (k 为整数)。

正弦振动是周期振动的特例,除在频率 $\frac{1}{T}$ 外,其他频率的振动值均为零,也即只在频率 $\frac{1}{T}$ 处有能量。

图 2-3 给出了周期振动的时域和频域特征。

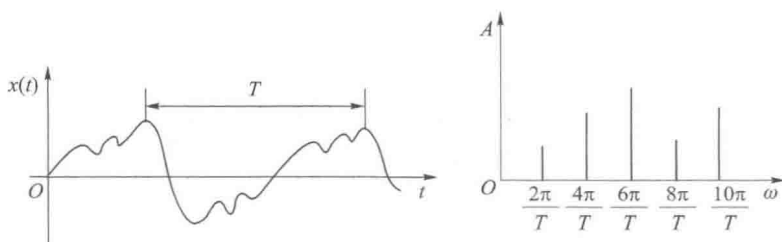


图 2-3 周期振动的时域和频域图

例 2.2 一周矩形波 $x(t)$ 如图 2-4 所示,其幅值为 1,周期为 1 ms,宽度为 0.5 ms,画