

# 振动台及振动试验

奚德昌 赵钦森 编

试验机丛书

# 振动台及振动试验

奚德昌 赵钦森 编



机械工业出版社

本书为《试验机丛书》之一。该书系统地介绍了振动理论基础、随机振动、机械式振动台、电动振动台、电液振动台、激振器、振动试验及数据处理，详细地论述了各类振动台的工作原理及几种典型负载的振动台工作特性。本书附有简单弹性元件的刚度及部分国内外振动台型号、主要技术参数表，可供有关人员选用时参考。

本书可供从事振动试验、动态测试，振动台设计和制造的科技人员参考。

试验机丛书

振动台及振动试验

奚德昌 赵钦森 编著

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092  $1/32$  ·印张 13 ·字数 277 千字  
1985年10月北京第一版·1985年10月北京第一次印刷  
印数 0,001—4,140 ·定价 3.10 元

统一书号：15033·6097

## 前 言

试验机是在各种条件、环境下测定金属材料、非金属材料、机械零件、工程结构等的机械性能、工艺性能、内部缺陷和校验旋转零部件动态不平衡量的仪器。在研究探索新材料、新工艺、新技术和新结构的过程中，试验机是一种不可缺少的重要测试仪器。它广泛应用于机械、冶金、石油、化工、建筑、航空、造船、交通运输等工业部门及大专院校等，对有效使用材料、改进工艺、提高产品质量、降低成本、保证产品安全可靠等都具有重要作用。

近年来，我国试验机及其试验测试技术水平都取得了较快的发展，从事这方面工作的人员也大量增多，为了适应新形势发展的需要，帮助有关人员了解和掌握试验机的基本知识，我们组织编写了这套《试验机丛书》。

本丛书预定分十一分册，其中有：《金属材料试验机》、《非金属材料试验机》、《硬度计及其应用》、《试验机的负荷与位移测量系统》、《试验机的电液伺服系统》、《试验机的环境模拟装置》、《振动台及振动试验》、《转子平衡技术与平衡机》、《超声无损检测仪》、《射线探伤机》、《电磁探伤机》，将陆续出版。

本丛书在文字叙述上力求深入浅出、简明易懂，在内容上重点阐述各种试验机的原理、结构、用途，并扼要地介绍试验机的使用、试验方法、维护要点以及发展趋势等。

这套丛书是在中国仪器仪表学会领导下，在有关高等院校、科研单位和工厂的大力支持下，由试验机学会组织编写

的。很多同志为我们收集和提供了丰富的资料，并在编写和审稿过程中提出了很多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

本书由航天工业部七〇二所廖礼轩同志主审。

由于我们的水平所限，书中不当之处甚至错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

# 符 号 表

- A 振幅
- a 加速度
- B 磁通密度、带宽
- C 电容、傅里叶变换、常数
- c 粘性阻尼系数、泄漏系数、流量系数
- D 系数、累积疲劳损伤量
- d 距离
- $E[x]$   $x$  的统计平均值
- E 弹性模量
- e 感应电势、偏心距
- F 力、激励
- f 频率
- G 重量
- g 重力加速度
- H 频率响应函数、幅值
- h 脉冲响应函数、高度
- I 电流
- i 电流
- J 转动惯量、截面惯性矩
- $j = \sqrt{-1}$
- K 力常数、疲劳曲线斜率、倍频程扫描率
- k 刚度系数、压力系数、流量增益
- L 电感
- l 长度
- M 互感

- $m$  质量  
 $N$  整数、减缩系数、疲劳破坏的循环次数  
 $n$  衰减系数、转速、整数、振动次数  
 $P$  概率、概率分布、压力、功率  
 $p$  固有角频率、概率密度  
 $Q$  品质因子  
 $q$  流量  
 $R$  电阻、磁阻、自相关函数、互相关函数  
 $r$  频率比值、特征根、整数  
 $S$  功率谱密度、互功率谱密度、灵敏度  
 $S$  面积  
 $T$  周期  
 $t$  时间  
 $U$  电压  
 $u$  电压  
 $V$  速度幅值、体积  
 $v$  速度  
 $W$  加速度幅值、功率谱密度、面积梯度  
 $\omega$  匝数  
 $X$  位移、响应 $x$ 的傅里叶变换  
 $x$  位移 随机变量、周期函数、响应  
 $y$  位移  
 $Z$  阻抗  
 $A-D$  模数转换器  
 $D-A$  数模转换器  
 $FFT$  快速傅里叶变换  
 $a$  相位  
 $\beta$  体积弹性模量、对数扫频率  
 $\gamma$  耦合系数、材料比重  
 $\delta$  静伸长、对数减缩系数、气隙长度、狄拉克函数

- θ 相位
- ξ 随机变量、比值
- γ 动力放大系数
- ϕ 转角、时间间隔
- η 比热的泊松比值
- λ 固有振型、振动疲劳等效因子
- μ 质量比、导磁率
- ν 阻尼比值
- ρ 质量密度
- σ 统计有效值(标准偏差)、应力幅值
- τ 时间
- φ 相频特性
- ψ 全磁通
- ω 角频率



# 目 录

## 前言

## 符号表

## 第一章 振动理论基础..... 1

### 第一节 振动的运动学..... 1

一、振动的定义..... 1

二、简谐振动..... 2

三、同一方向上简谐振动的合成..... 4

1. 两个频率相等..... 5

2. 两个频率不相等, 频率比值 $\omega_1/\omega_2$ 为一个有理数..... 6

3. 两个频率不相等, 频率差是一个小值..... 6

四、互相垂直的简谐振动的合成..... 8

1. 频率相同, 互相垂直的简谐振动的合成..... 8

2. 频率不相同, 互相垂直的简谐振动的合成..... 11

五、周期振动的分解..... 12

### 第二节 一个自由度系统的振动..... 14

一、自由振动..... 14

1. 弹簧-质量系统..... 14

2. 弹簧-质量垂直系统的固有频率..... 18

3. 多弹簧-质量系统的固有频率..... 19

4. 电感-电容电路的固有频率..... 21

5. 声振动系统..... 22

二、阻尼自由振动..... 23

1. 欠阻尼情况( $n < p$ )..... 25

2. 临界阻尼情况( $n = p$ )..... 29

3. 过阻尼情况( $n > p$ )..... 30

三、简谐力作用下的强迫振动..... 31

1. 运动方程及其解	32
2. 稳态强迫振动	34
3. 稳态强迫振动的速度	40
4. 稳态强迫振动的加速度	41
5. 相频特性	43
四、机械阻抗	44
1. 机械阻抗的定义	45
2. 阻尼、弹簧、质量的机械阻抗	43
3. 几种典型的机械系统的机械阻抗	52
第三节 两个自由度系统的振动	55
一、自由振动	55
1. 运动方程及其解	55
2. 频率方程	57
3. 固有频率	58
4. 固有振型	61
5. 运动方程的通解	63
二、简谐力作用下的强迫振动	64
1. 运动方程及其解	64
2. 幅频特性	68
<b>第二章 随机振动</b>	71
第一节 随机振动的特性	71
一、概率、概率分布、概率密度	72
二、高斯 (Gauss) 分布 (又称正态分布)	77
三、平均值、均方值、统计有效值	78
四、各态历经	83
五、功率谱密度	85
1. 频谱分析	86
2. 功率谱密度	90
六、相关函数	95

1. 自相关函数	96
2. 自相关函数与功率谱密度的关系	99
3. 互相关函数和互功率谱密度	103
<b>第二节 线性系统的随机振动</b>	104
<b>一、频率响应法</b>	104
1. 频率响应函数	104
2. 频率响应函数与动力放大系数、机械阻抗的关系	105
3. 频率响应法	105
<b>二、脉冲响应法</b>	107
1. 脉冲响应函数	107
2. 脉冲响应法	109
<b>三、频率响应函数与脉冲响应函数的关系</b>	111
<b>四、线性系统的响应</b>	112
1. 响应的平均值 $E[x(t)]$	113
2. 响应的自相关函数	114
3. 响应的功率谱密度 $S_x(\omega)$	114
4. 响应的均方值 $E(x^2)$	115
5. 激励和响应的互相关函数 $R_{fx}(\tau)$ 及互功率谱密度 $S_{fx}(\omega)$	116
<b>五、弹簧-质量系统的响应</b>	117
<b>第三章 机械式振动台</b>	122
<b>第一节 振动台和激振器</b>	122
<b>第二节 偏心式机械振动台</b>	122
<b>一、工作原理</b>	122
<b>二、幅频特性</b>	123
1. 空载或刚性负载	123
2. 弹性负载	125
<b>三、主要特性</b>	129
1. 负载	129
2. 振动频率	129

3. 振幅及失真	129
第三节 偏心-弹簧式机械振动台	131
一、工作原理	131
二、幅频特性	132
1. 空载或刚性负载	132
2. 弹性负载	135
三、主要特性	140
1. 负载	140
2. 振动频率	140
3. 振幅及失真	141
第四节 离心式机械振动台	141
一、工作原理	141
二、幅频特性	143
1. 空载或刚性负载	143
2. 弹性负载	145
三、主要特性	149
1. 负载	149
2. 振动频率	149
3. 振幅及失真	150
第五节 机械式振动台的优缺点	151
第四章 电动振动台	152
第一节 优缺点及种类	152
第二节 工作原理	152
第三节 幅频特性	154
一、定电流下空载或刚性负载	154
1. 方程及电动力	154
2. 位移、速度及加速度	156
3. 输出机械阻抗	159
二、定电流下弹性负载	161

1. 倒挂弹性负载	161
2. 纯弹性负载	161
3. 弹性负载	162
4. 输出机械阻抗	167
三、定电压下空载或刚性负载	169
1. 方程	169
2. 位移、速度及加速度	171
3. 输出机械阻抗及等效阻抗(输入阻抗)	175
四、定电压下弹性负载	180
1. 倒挂弹性负载	180
2. 纯弹性负载	181
3. 弹性负载	181
4. 输出机械阻抗	186
5. 等效阻抗	187
第四节 主要特性	190
一、电动力	190
1. 提高力常数	190
2. 增大电流	192
3. 多点激振	193
二、振幅	194
1. 减小对悬挂弹簧的静作用力	194
2. 机电反馈	196
三、频率	197
1. 悬挂弹簧	197
2. 动圈	198
3. 高输出阻抗的功率放大器	198
4. 外接电容	199
5. 短路环	199
四、失真	200

1. 磁场 .....	201
2. 动圈反应 .....	201
3. 悬挂系统 .....	202
4. 振动系统 .....	203
五、横向振动及转动振动 .....	203
六、激振力与功率、重量的关系 .....	206
第五节 随机振动 .....	207
一、电动力的统计值 .....	207
二、给定电流功率谱密度时的响应 .....	208
1. 空载时的频率响应函数及功率谱密度 .....	208
2. 空载时的均方值 .....	212
3. 刚性负载、倒挂弹性负载及纯弹性负载时的响应 .....	219
4. 弹性负载时的响应 .....	219
三、给定电压功率谱密度时的响应 .....	222
1. 空载时的频率响应函数及功率谱密度 .....	222
2. 空载时的均方值 .....	225
3. 刚性负载、倒挂弹性负载及纯弹性负载时的响应 .....	233
4. 弹性负载时的响应 .....	233
四、随机电动振动台的适用性 .....	236
<b>第五章 电液振动台 .....</b>	<b>238</b>
第一节 优缺点 .....	238
第二节 工作原理 .....	239
第三节 幅频特性 .....	242
一、空载或刚性负载 .....	242
1. 方程 .....	242
2. 定电压时一级阀阀芯的位移 .....	249
3. 定电流时一级阀阀芯的位移 .....	251
4. 二级阀阀芯的位移 .....	252
5. 台面的位移 .....	256

6. 定电压时台面的幅频特性	258
7. 定电压时的激振力	262
8. 定电流时台面的幅频特性	263
9. 定电流时的激振力	265
二、纯弹性负载	266
1. 台面位移	266
2. 定电压时的幅频特性	268
3. 定电流时的幅频特性	271
三、倒挂弹性负载	271
第四节 极限特性	271
第五节 压力和流量的确定	273
一、刚性负载	273
二、纯弹性负载	275
第六节 随机振动	276
一、激振力的统计值	276
二、给定电流功率谱密度时的响应	277
1. 频率响应函数	277
2. 台面运动量的功率谱密度及均方值	278
3. 激振力的功率谱密度及均方值	279
三、给定电压功率谱密度时的响应	280
1. 频率响应函数	280
2. 台面运动量的功率谱密度及均方值	280
3. 激振力的功率谱密度及均方值	281
第七节 其他型式的电液振动台	282
一、喷嘴-挡板式电液振动台	282
二、电场阀激振器	284
第六章 激振器	285
第一节 电磁激振器	285
一、优缺点	285

二、工作原理	286
三、电磁激振力	287
四、感应电势	290
五、幅频特性及随机振动	291
六、主要特性	293
1. 非接触式	293
2. 电磁力	293
3. 电磁力的统计有效值	298
4. 频率	300
5. 振幅	300
6. 失真	300
7. 软铁(或铁质试件)振动的不均匀性	302
第二节 气体激振器	302
一、圆盘调制式工作原理	303
二、圆筒调制式工作原理	304
第三节 压电激振器	304
第四节 磁致伸缩激振器	306
<b>第七章 振动试验及数据处理</b>	<b>307</b>
第一节 环境振动试验标准	307
一、试验种类	308
二、试验方法	308
三、试验轴向	308
四、试验时间或次数	308
五、试验控制和控制误差	309
第二节 周期性振动试验	309
一、定频试验	309
二、共振试验	310
三、正弦扫描试验	311
1. 线性扫描	311



2. 对数扫描	311
第三节 随机振动试验	316
一、宽带随机试验	317
二、窄带随机试验	321
三、数控随机试验	323
第四节 振动试验夹具	325
一、夹具的设计	326
二、夹具的形式	327
1. 转接板	327
2. 立方体夹具	327
3. L形和T形夹具	327
4. 半球形和锥形夹具	328
5. 油膜水平滑台	328
三、夹具的制造	329
1. 螺接夹具	330
2. 铸造夹具	330
3. 焊接夹具	330
4. 粘结夹具	330
5. 环氧树脂成形夹具	330
第五节 随机试验数据的处理	330
一、随机振动的测量和分析方法	331
二、随机数据处理的一般过程	332
1. 数据准备	332
2. 数据性质的检验	336
3. 数据分析	340
三、模拟量处理方法	340
1. 平均值和均方值	341
2. 概率密度	343
3. 自相关函数	345