

ZHENDONG YU CHONGJI 振动
SHOUCE

与冲击手册

第二卷 振动与冲击测试技术

《振动与冲击手册》编辑委员会 编著

振动与冲击手册

第二卷

振动与冲击测试技术

《振动与冲击手册》编辑委员会 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

《振动与冲击手册》是一部反映我国机械、仪器仪表、土木建筑、船舶车辆、航空航天等领域中有关振动与冲击的实际问题和最新成就的大型工具书。它既包括基本理论研究，又注重了工程应用，紧密结合我国国情，反映了这一领域的最新成果，如：“振动利用”、“模态综合技术”、“管系振动”等。本《手册》用简便、直观的形式为从事振动工作的同志提供了解决问题的最佳途径。

本《手册》共分三卷：第一卷为基本理论和分析方法；第二卷为测试技术；第三卷为工程应用。全书共三十二章，分别由在各有关领域工作的四十多位专家和科技人员执笔编写。

本《手册》可供工程技术界、科研单位、高等院校等从事“振动与冲击”基础理论研究、测试技术研究及具体解决生产中的振动、冲击问题的广大科技人员使用，亦可作为大学高年级学生及研究生的参考书。

振 动 与 冲 击 手 册

第 二 卷

振 动 与 冲 击 测 试 技 术

《振动与冲击手册》编辑委员会 编著

*

国防工业出版社 出版、发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码：100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张30³/₄ 插页2 714千字

1990年11月第一版 1990年11月第一次印刷 印数：0,001—2,500册

ISBN 7-118-00672-6/TB·24 定价：22.20元

科技新书目 230-037

《振动与冲击手册》编辑委员会名单

主 编 唐 照 千 黄文虎

副主编 恽伟君 郭营川 黄敦朴

编 委 唐 照 千 黄文虎 恽伟君 郭营川 黄敦朴 庄表中 陈予恕

宋文治 屠良尧 张景绘 朱光汉 付汝楫

责任编辑 吴芝萍

特邀编辑 罗友祥 俞则人

* * *

本卷主编 郭营川

本卷编写人员 (以章节顺序为序)

第一章: 唐 照 千 张景绘

第二章: 屠良尧

第三章: 袁宏义

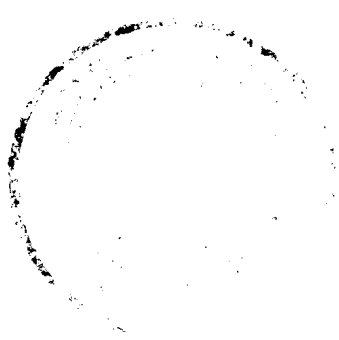
第四章: 陆鸿章 王涌泉

第五章: 屠良尧

第六章: 宋文治

第七章: 郭营川

第八章: 张景绘



序

振动与冲击既是一门古老的学科，又是近年来有很大发展的技术。它的应用几乎涉及到各个工业部门。近一、二十年来，在这个领域内新方法、新技术发展之快；文献资料增加之多，虽不需用“爆炸”二字来形容，但用“迅猛”二字是恰如其分的。一方面是我国社会主义现代化建设中有大量的振动与冲击问题需要解决，另一方面又有相当多的新成果可供利用，即需要和可能并存，问题是要使两者迅速结合起来。编写一部《振动与冲击手册》是促使两者结合的有效措施，也是在工程实际、科研和教育战线上从事有关工作的广大科技人员的渴望。人们盼望有一部能反映国内外最新成就、联系我国实际并且便于查阅的工具书，这部《振动与冲击手册》即能满足上述需要。

纵观《手册》全稿，其内容由三大部分组成：基本理论和分析方法、测试技术、工程应用，选材是比较全面的。从布局上看，《手册》着重于应用，测试技术和工程应用各占一卷，而在基本理论和分析方法一卷中，也处处注意到应用。这正是编著者的主导思想。在《手册》中还包含了一些新兴学科分支，如参数辨识和试验模态分析，动态子结构法；非线性振动；耦合振动分析等。与七十年代国外出版的同类工具书如《冲击与振动手册》、《振动工程大全》相比，本《手册》给人以近（结合国情）感和新感。我深信，这部具有近新特色的《手册》必将受到读者的欢迎。

回忆六年前《振动与冲击》杂志的编委们提出编写一部我国自己的手册时，我曾担心此事涉及面广、工作量大而难于在短时期内完成。如今，通过四十多位专家的辛勤工作，《振动与冲击手册》终于与大家见面了，真是有志者事竟成。在喜庆之余特写数言，一向编著者取得的成就表示祝贺，二向广大读者推荐。这就算一篇“序”吧。

胡海昌

前 言

为了实现我国四个现代化建设的宏伟目标，为了振兴我国的经济，党中央提出了明确的指导方针，即经济振兴必须依靠科学技术进步，科学技术工作要面向经济建设。根据这一指导方针，编写一本反映当代科学技术最新成就的、适合中国情况的《振动与冲击手册》，不仅是我们长期的愿望，而且是一个迫切的需要。

振动与冲击问题是经济建设和生产实际中经常大量遇到的问题，有待我们科技工作者去研究和解决。这些问题的解决，要求我们不断地深入研究它的基本现象，机理和理论；要求我们不断地采用新的技术，运用先进的工具，吸收各方面的经验，深入研究问题，提出解决问题的途径和方案。编写一本《振动与冲击手册》，将会对我国科技工作者解决大量工程实际中的振动与冲击问题，提供一定的帮助。

当今，国外已有一些《冲击与振动手册》、《振动工程大全》之类的工具书出版。但是，这些工具书大多成书于七十年代以前，当今振动与冲击领域的一些最新发展并没有得到充分的反映。编写一本反映当代最新科技成就的、有中国自己特色、便于中国科技人员使用的《振动与冲击手册》，仍然是很有必要的。

这本《振动与冲击手册》以机械、仪器仪表、土木建筑、船舶车辆、航空航天等领域的厂矿生产设计部门、科研机构、大专院校的科技工作者为对象，内容包括振动与冲击的理论和实际应用的各个方面。本手册共分三卷，第一卷为基本理论和分析方法；第二卷为测试技术；第三卷为工程应用。全书共三十二章，分别由在有关领域工作的四十多位专家和科技人员执笔，他们分布在国内各行各业的各条战线上，有的从事理论研究与教学工作；有的从事生产实际工作；有的从事测试、试验工作。我们相信，这本手册将能反映当代振动和冲击领域的最新成就，反映我国的实际，反映我国的经验，便于读者使用。

在编写这本手册时，我们考虑到以下几点：

(1) 以我国具有大专以上文化水平的科技人员为对象，适应不同行业的实际工作以及知识更新的需要。

(2) 在振动与冲击专业领域内，力求内容的系统性和完整性，同时又注意实际应用。

(3) 力求反映当代科学技术的最新成就，对一些还在发展中但已开始得到实际应用的₄新内容，也加以搜集编写。

(4) 编写中阐述问题与汇集资料并重，既省略繁琐的公式推导，尽量汇集便于查阅的公式、数据和图表；又注意说明问题的本质和来龙去脉，以避免对公式的简单套用和误解；其中若干章节也可作为教材供教学参考之用。

(5) 附有参考文献，以利查阅。

(6) 由于本手册是集体编写，虽然对全书作了统一安排，力求繁简一致、前后呼应，但由于各章内容各有特色，又由于是初版，难免前后有不一致之处。全书的基本符

号做到统一，各章的专用符号均有说明。

这本手册最早是由已故的主编唐照千教授倡导并组织编写的。唐照千教授对手册倾注了自己的心血，促进了手册的成书出版。

在编写过程中，尽管已做了很大的努力，但由于是第一次编写如此篇幅较大、内容较全的手册，且由于我们水平的限制，遗漏和叙述不当之处在所难免，我们诚恳地欢迎广大读者批评指正，以便再版时更正。

最后，我们向胡海昌先生在本手册的编写工作中给予的支持表示衷心的感谢。

目 录

第一章 振动与冲击测试技术概论	1	附表三 弹性结构各相似常数及其关系式	56
1.1 振动测试的重要性	1	附表四 简单系统的速度阻抗和速度导纳图	58
1.2 振动测试技术的发展	2	参考文献	61
1.3 振动测试的类别及主要影响因素	3	第三章 传感器	62
1.4 振动测量	4	3.1 引言	62
1.5 振动环境模拟试验	5	3.2 传感器的数学模型及其特性	62
1.6 结构动力学试验及数据处理技术	5	3.2.1 零阶传感器	63
1.7 振动测试技术的应用和发展中的几个问题	7	3.2.2 一阶传感器	63
第二章 相似方法和机电系统理论	9	3.2.3 二阶传感器	64
2.1 相似方法	9	3.2.4 绝对式二阶传感器	65
2.1.1 相似、相似方法和建模	9	3.3 压电式传感器	73
2.1.2 基本量和导出量,量纲和量纲指数	10	3.3.1 压电效应、振动模式和压电材料	73
2.1.3 相似三定理	10	3.3.2 压电式传感器的等效电路	75
2.1.4 振动中常用的相似概念	13	3.3.3 压电式加速度计	77
2.1.5 相似准则的推导方法	15	3.3.4 压电式力传感器	81
2.1.6 弹性结构的相似常数	19	3.3.5 冲击力锤	82
2.2 机械导纳方法	20	3.3.6 阻抗头	82
2.2.1 三种导纳和阻抗的定义	21	3.3.7 压电式传感器测量电路	82
2.2.2 基本元件的导纳和阻抗计算	21	3.4 压阻式传感器	84
2.2.3 集总系统的导纳和阻抗	23	3.4.1 概述	84
2.2.4 分布系统的导纳和阻抗	24	3.4.2 压阻效应	84
2.2.5 机械导纳方法之一——基架线法	28	3.4.3 压阻式加速度计	85
2.2.6 机械导纳方法之二——求碰撞力的集总系统法	30	3.5 磁电式传感器	89
2.2.7 机械导纳方法之三——子结构法	32	3.5.1 工作原理、结构和特性	89
2.3 机电变换理论	33	3.5.2 主要参数计算及材料性能	90
2.3.1 机电理论基本公式	33	3.6 变磁阻式传感器	92
2.3.2 可逆变换器理论	37	3.6.1 差动电感和差动变压器式传感器	92
2.3.3 常用变换器的特征传递矩阵和频响函数	41	3.6.2 电涡流传感器	94
2.4 机电模拟和机电网络	44	3.7 电容式传感器	95
2.4.1 两种机电模拟	44	3.8 伺服式加速度计	97
2.4.2 机械网络	45	3.8.1 工作原理	97
2.4.3 机电网络	50	3.8.2 静态和动态特性	98
2.4.4 广义机电模拟	53	3.9 驻极体振动传感器	100
附表一 常用力学量的量纲	54	参考文献	100
附表二 常用力学量和电学量的名称、符号、单位及换算关系	55	第四章 振动冲击试验台与激振器	101
		4.1 振动冲击试验对设备的要求	101
		4.1.1 振动试验对设备的要求	101

4.1.2	冲击试验对设备的要求	101	5.5.2	正弦稳态激励	197
4.1.3	振动冲击台应具备的条件和功能	102	5.5.3	正弦扫描激励	198
4.1.4	振动冲击台的类型和特点	102	5.5.4	瞬态激励	200
4.2	振动试验台	104	5.5.5	随机激励	202
4.2.1	机械振动台	104	5.6	结构动态特性测试技术	204
4.2.2	电动振动台	128	5.6.1	概述	204
4.2.3	电液振动台	145	5.6.2	结构动态特性参数简易测试方法	204
4.2.4	模拟汽车运输振动试验台	153	5.6.3	测力计和阻抗头的使用	207
4.3	振动台的辅助设备——水平滑台	154	5.6.4	机械导纳测试的典型用途和图形	209
4.3.1	水平滑台的基本参数	154	5.6.5	机械导纳稳态测试技术	212
4.3.2	水平滑台的原理和结构	154	5.6.6	机械导纳瞬态测试技术	213
4.3.3	水平滑台的刚度	157	5.6.7	机械导纳随机测试技术	217
4.4	冲击试验台	157	5.6.8	环境激励时的动态特性测试	217
4.4.1	冲击试验台的基本参数和主要指标要求	157	5.7	振动环境模拟试验	218
4.4.2	冲击试验台的工作原理和结构	157	5.7.1	环境试验的分类、用途和等效关系	218
4.5	激振器	162	5.7.2	疲劳模拟试验和加速试验方法	219
4.5.1	激振器的类型	162	5.7.3	宽带随机试验和数字控制设备	220
4.5.2	激振器的应用	162	5.7.4	应力筛选方法	221
4.6	振动台基本参数的检定	163	5.7.5	磁带随机法	222
4.6.1	一般规定	163	5.7.6	振源驻留试验	223
4.6.2	检定测试方框图	163	5.8	旋转机械的振动测试技术	223
4.7	振动冲击台的选择和使用	164	5.8.1	传感器的选择和使用	224
4.7.1	振动冲击台选型时应注意的问题	164	5.8.2	激振器的选择和使用	224
4.7.2	振动冲击台使用时应注意的问题	165	5.8.3	用传感器信号进行初步振动分析	224
参考文献		166	5.8.4	旋转机械振动分析仪器——数字矢量滤波器	225
第五章	振动测试技术	167	参考文献		227
5.1	概述	167	第六章	冲击测试技术	230
5.1.1	振动测试的意义和用途	167	6.1	引言	230
5.1.2	振动测试的分类和内容	168	6.2	冲击波形测量	230
5.1.3	振动测试的仪器设备	169	6.2.1	冲击波形的特点及测量要求	230
5.2	周期振动简易测量方法	169	6.2.2	冲击测量方案的制订	232
5.2.1	周期振动参数	169	6.2.3	冲击测量设备的选择	233
5.2.2	周期振动简易测量方法	170	6.2.4	冲击测量步骤	239
5.3	传感器的选择和使用	173	6.2.5	冲击测量中的零飘问题	241
5.3.1	传感器的分类	173	6.2.6	冲击测量系统中的地回路干扰	242
5.3.2	传感器的选择	174	6.2.7	冲击测量中的相移和滞后	242
5.3.3	传感器的最优布置方案	177	6.3	冲击频谱的测量方法	246
5.3.4	传感器最优位置的事后选择	181	6.3.1	数字频谱分析法	246
5.3.5	传感器使用时的注意事项	181	6.3.2	模拟频谱分析法	246
5.4	激振设备的选择和使用	182	6.4	冲击响应谱测量	246
5.4.1	激振设备的分类	183	6.4.1	冲击响应谱的定义	247
5.4.2	振动台的辅助设备设计	183	6.4.2	冲击响应谱的用途	247
5.4.3	电动台的工作特性	187	6.4.3	冲击响应谱的测量方法	248
5.4.4	振动台的使用和选择	191	6.4.4	冲击响应谱数字分析中的参数选择	254
5.4.5	激振器的最优布置方案	192	6.4.5	不同Q值间冲击响应谱的转换	256
5.4.6	激振器的使用 and 选择	193	6.4.6	冲击响应谱与傅里叶频谱的关系	258
5.5	激励技术	195	6.5	冲击试验方法	259
5.5.1	激励函数的分类	195			

6.5.1 冲击规范与分类	259	8.3.5 采样定理与混叠现象	397
6.5.2 冲击波形模拟试验方法	260	8.3.6 快速傅里叶变换 FFT	397
6.5.3 冲击响应谱模拟试验方法	270	8.3.7 泄漏现象及窗函数的选择	397
6.5.4 地震模拟试验方法	282	8.3.8 频率细化	397
6.5.5 高速撞击冲击环境模拟试验方法	284	8.3.9 拉普拉斯变换的应用	397
6.5.6 爆炸分离冲击模拟试验方法	286	8.4 Z变换及数字滤波	397
参考文献	288	8.4.1 Z变换的定义	397
第七章 传感器的校准	323	8.4.2 Z变换的主要性质	397
7.1 稳态校准	324	8.4.3 部分分式法求逆Z变换	397
7.1.1 地球重力场校准	324	8.4.4 使用Z变换求解差分方程	398
7.1.2 静态力校准	325	8.4.5 数字滤波器	398
7.1.3 离心机校准	326	8.5 希尔伯特变换	411
7.1.4 正弦振动校准	326	8.5.1 希尔伯特(Hilbert)变换的 定义	411
7.1.5 互易法校准	344	8.5.2 希尔伯特变换的性质	411
7.1.6 横向灵敏度的校准	351	8.5.3 实离散信号的希尔伯特变换	411
7.1.7 各种环境条件下的校准	362	8.5.4 希尔伯特变换的计算	411
7.2 瞬态校准	366	8.5.5 希尔伯特变换在振动中的应用	411
7.2.1 冲击校准装置	366	8.6 卷积及相关分析	421
7.2.2 冲击校准方法	370	8.6.1 卷积的定义和主要性质	421
参考文献	376	8.6.2 卷积的算法及圆卷积	421
第八章 振动信号分析与数据处 理	378	8.6.3 卷积在振动数据处理中的应用	421
8.1 概述	378	8.6.4 相关分析	422
8.1.1 振动信号、数据及其表现形式	378	8.6.5 倒频谱(Cepstrum)及解卷积	424
8.1.2 振动信号分析的目的	378	8.7 数据拟合	426
8.1.3 信号分析与处理过程	378	8.7.1 线性最小二乘估计	426
8.1.4 振动信号的特征和特征量	379	8.7.2 非线性最小二乘估计	428
8.1.5 数据处理系统	381	8.8 振动信号的基本性质分析	430
8.2 数据预处理	382	8.8.1 振动信号的基本特征量	430
8.2.1 数据的采集	382	8.8.2 谱分析	432
8.2.2 信号的数字化及其量化误差	382	8.8.3 周期振动信号分析	435
8.2.3 平稳性检验	383	8.8.4 冲击和瞬态信号的分析	437
8.2.4 高斯分布检验	383	8.8.5 平稳随机信号分析	441
8.2.5 数据归一化	384	8.8.6 非平稳随机振动信号分析	451
8.2.6 消除趋势项	385	8.8.7 多维平稳随机信号的分析	458
8.2.7 野点的剔除	386	8.8.8 时间序列的数学模型	459
8.2.8 周期分量的分离	386	8.9 振动系统分析	467
8.2.9 数据校准	387	8.9.1 由试验数据估计频率响应函数	467
8.2.10 低通滤波	388	8.9.2 相干分析	468
8.3 傅里叶变换	388	8.10 数据处理的其他应用	473
8.3.1 傅里叶变换	389	8.10.1 振动系统的响应试验	473
8.3.2 因果信号的傅里叶变换	392	8.10.2 载荷识别	477
8.3.3 傅里叶谱分析的滤波器法	392	8.10.3 振动系统的监视与故障诊断	478
8.3.4 离散傅里叶变换(DFT)	393	8.10.4 模态参数识别中的数据 处理	479
		参考文献	482

第一章 振动与冲击测试技术概论

研究系统（机械、结构、人体或生物体等）的动力特性，分析产生振动的原因，考核设备承受振动和冲击能力，以及考查振动与环境（包括自然环境与感生环境）的关系时，除了理论分析外，测量和试验是一种重要的必不可少的手段。

振动测试主要有下述基本内容：

(1) 振动量的测量与分析 在现场工作条件或试验室试验状态下，对系统在选定点、选定方向上的位移、速度、加速度、应变、激振力等的变化进行测量、记录和分析。

(2) 系统特征函数、特性参数的测试 包括系统的频率响应函数、脉冲响应函数、模态参数、物理参数等。

(3) 机械、结构或部件的振动环境模拟试验（动强度试验）和动态响应模拟试验。

1.1 振动测试的重要性

振动测量与试验一直是工程技术界重视的课题，对于航空航天、动力机械、交通运输、军械兵器、能源工业、土木建筑、电子工业、环境保护等尤为重要。振动直接影响着机器（或结构）的运行稳定性、安全性，人体感觉的舒适性，直接影响着生产的有效性和精确性。在设计阶段就要利用振动测试手段，对样机（原型或模型）进行动力特性研究。图 1.1 归纳了振动测试技术在产品设计和运行中的地位。

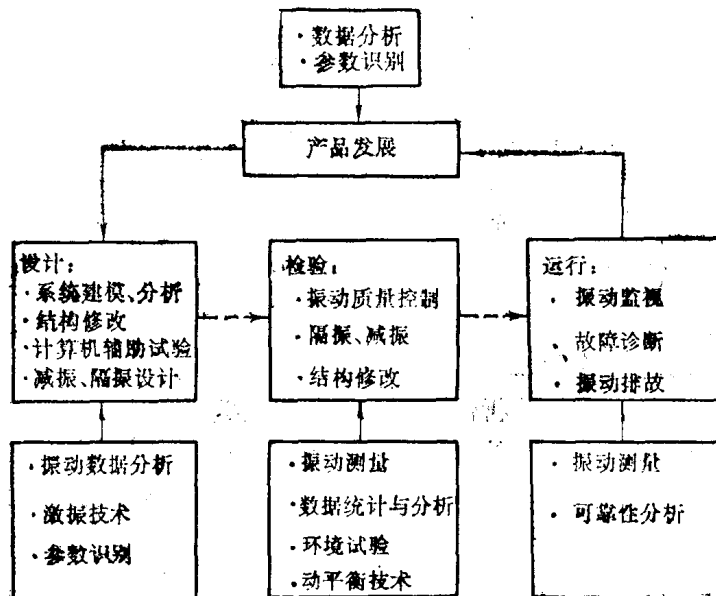


图 1.1 振动测试技术在产品设计、运行中的应用

在有关的标准中规定了振级的允许值。在设计阶段就应考虑产品的动力特性，利用振动测试手段，对样机进行试验，得到动特性和动响应的预估，作为改进设计的基础和修改数学模型的依据，从而进行结构修改。

振动测试也是产品质量评价和成批产品质量控制的手段。例如，对大型旋转机械的现场动平衡，对电子产品、精密仪表的振动环境试验等。

产品投入运行后，利用振动监控产品运行状态则更为重要，为此设计和制造高可靠性的振动监控系统便成为振动测试技术的一个重要方面。分析产生振动的原因，预先发现结构中隐藏的危险因素，可避免事故的发生，这也是振动测试的目的之一，即故障诊断。

近年来计算技术在振动测试中得到了广泛的应用，使振动测试技术与理论分析方法同时成为研究结构动力学的两个相辅相成的手段，理论分析的数学模型要由试验数据加以修改和完善，正确的数学模型又是制定振动试验方案和数据分析的基础。

1.2 振动测试技术的发展

高质量的测试仪器、设备及现代化的测试方法是随着生产的需要发展起来的，开始仅使用机械式测振仪，而目前应用各种物理学原理制成的机电传感器、*FFT* 硬件分析仪、结构动力学分析软件等已在振动测试技术中得到了广泛的应用。

20 年代中，随着汽轮发电机组的发展，机械式测振仪已不能满足要求，于是研制了磁电式传感器。二次大战后开始应用压电式传感器，压电传感器体积小、重量轻、频率范围宽、动态量程大，可测量振动，也可测量冲击。近年来又发展了可使用在各种恶劣环境下的压电传感器和内装阻抗变换器、放大器、滤波器的集成电路式压电加速度计，大大地拓宽了这种传感器的应用范围，提高了抗干扰能力和测量的精确度。压阻传感器的使用对包括零频率在内的振动、冲击信号的测量提供了可能性，为宽频带动态压力的测量创造了条件。与此同时，还陆续发展了各种换能原理的传感器及配套仪器，如变电容传感器、光纤传感器、电涡流传感器等，以使用于不同的场合。

50 年代起开始重视对测量信号的分析，主要是频谱分析，发展了以带通滤波器为核心的模拟式分析仪器，不断改进其分析精度，至今仍在应用。但由于振动信号的变化快、频带宽，对信号分析的精度和速度的要求不断提高，模拟式分析仪已不能满足要求。60 年代后，*FFT* 算法的提出和应用，尤其是以 *FFT* 硬件为核心的多通道分析仪的广泛使用，大大地提高了分析速度，目前已被广泛地应用在数据处理和振动控制中。

近年来，计算机技术特别是微型计算机技术迅速发展。*FFT* 专用数据处理机与微型机相联，可组成数据处理系统，以这种数据处理系统为基础，发展了各种结构动力学分析软件，硬件和软件配合使用，构成了结构动力学分析系统，这就奠定了现代测试技术的基础。这种系统不但可以分析信号的各种参数，求出结构的模态参数，而且具有很强的显示能力，利用计算机可对结构进行修改。这种系统还可用来控制振动试验，组成各种用途的随机振动试验系统和冲击试验系统，使结构动力试验及振动环境试验发展到了一个新的水平。

随着振动测试技术的发展，研制了各种作用原理的振动台和冲击台。目前已基本上满足了各种结构动力学试验及环境试验的要求。

1.3 振动测试的类别及主要影响因素

根据振动测试的目的，测试系统可分为四类：振动量的测量系统、结构动力分析系统、振动环境试验系统和大型设备监控系统。其方框图分别见图 1.2、图 1.3、图 1.4 和图 1.5。

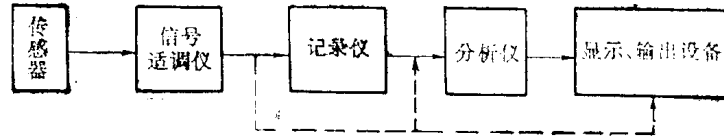


图1.2 振动量的测量系统

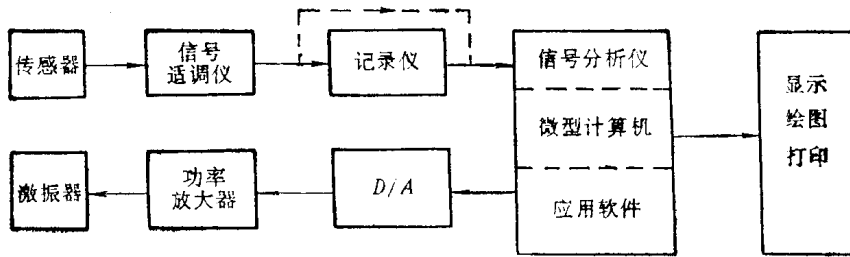


图1.3 结构动力分析系统

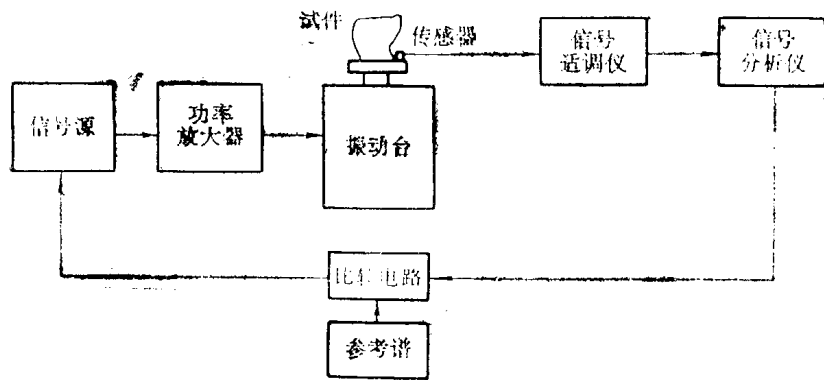


图1.4 振动环境试验系统

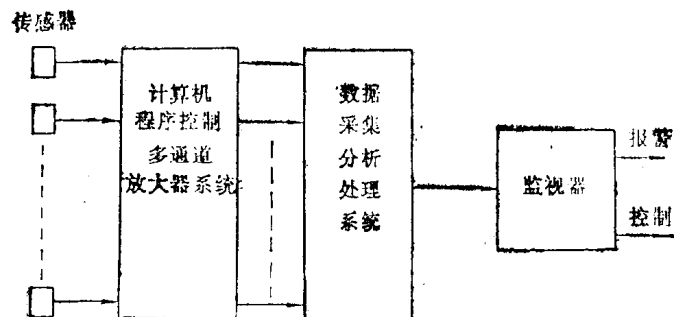


图1.5 大型设备监控系统

归结以上各种测试系统，可以发现它们全是由下列部分组合而成的：

- 传感器；
- 信号转换与适调仪器；
- 信号分析与处理设备；
- 激振设备；
- 计算机；
- 记录与显示设备。

在选择和研制振动测试系统及各部分仪器时，应考虑以下诸因素：

- (1) 根据测试目的和现有的设备条件及技术水平，选择测试系统及仪器，在选择时要考虑仪器的灵敏度、动态范围、频率范围、频率分辨率等特征参数，以求适应被测信号的大小和变化范围，防止频率失真和相位失真，得到合适的谱分析结果。
- (2) 考虑传感器的校准及整个测试系统的校准问题，以求得到准确的测量结果。
- (3) 考虑进行测试的环境条件：温度、气压、湿度、电磁场、光照、噪声、辐射强度等，以及测试是在室内还是在现场进行。
- (4) 信号的传输、记录、分析和显示的方便性及速度和效率对大型结构的测试是一个很重要的因素，要根据测试精确度的要求，合理地选择合适的微型计算机、合适的计算方法或计算机软件以及合适的图示记录方式。

1.4 振动测量

为适应各种场合下振动测量的需要，半个世纪来研制了各种原理各种形式的传感器，其分类见表1.1。总之，从不同的角度进行分类，有不同的名称，目前应用于振动测量的传感器已不下几十种，传感器制造技术的飞速发展也是使振动测试技术日趋完善的重要因素之一。

表1.1 振动与冲击传感器的分类

分类的依据	类别
根据测量原理	绝对式传感器 相对式传感器
根据测量方式	接触式传感器 非接触式传感器
根据被测参数	位移计 力传感器 速度计 阻抗头等 加速度计
根据作用原理	压电传感器 压阻传感器 感应传感器 电容传感器 涡流传感器 应变传感器 伺服传感器 电感传感器等
根据是否带内装放大器	带内装放大器的集成电路式传感器 不带内装放大器的

在这千变万化的传感器世界中，目前应用最广泛的是压电加速度计和压阻加速度

计, 它们都是采用惯性原理的绝对式传感器, 利用由质量块-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。目前它们正朝着集成电路化、整体化的方向发展, 从而可省去造价昂贵的电荷放大器, 并提高了抵抗外界干扰的能力, 配以记录、显示、读数仪器后便可直接测量各种振动量。

除此之外, 感应传感器、涡流传感器、电容传感器、伺服传感器在组成振动测量系统时也被广泛地应用着。

1.5 振动环境模拟试验

在试验室内于模拟实际的振动环境下对被研究对象进行考核, 以确定其承受振动能力的试验称为“振动环境模拟试验”。进行这种试验时, 首先要确定振动环境条件, 继而必须在试验室内模拟所确定的振动环境。

在确定振动环境条件时, 要进行实测、数据分析、数据统计归纳等工作, 从而制订出试验标准。限于试验的经济性和可行性, 在试验室内不可能完全复现实际的振动环境, 通常可根据等效原理对复杂的环境振动进行简化。被试结构的失效机理、等效原理和对产品可靠性(或寿命)的估计是试验工作者一直在进行探讨的重要课题。

根据推力和频率范围选择合适的激振设备是在试验室内再现振动环境的核心。对激振器来说, 要注意其安装方式, 以满足试验要求和发挥激振器的能力。对振动台来说, 被试构件是放在台面上, 其安装方式直接影响试验结果, 所以要特别注意夹具的设计。

激振系统主要包括三大部分: 振动台或激振器、功率放大器和控制器。

振动台主要有机械式、电动式和液压式三种。机械式振动台结构简单, 适用于低频, 价格便宜, 但可控性差、噪声大, 某些场合下仍在使用。电动式振动台采用动圈式结构, 可控性好、频率范围宽、噪声小, 可用计算机程序控制, 可实现各种波形, 可重现实测记录的时间历程, 可并联使用对大型结构物进行振动试验。液压式振动台仅适用于低频、推力大, 可控性好, 也可实现程序控制, 但造价高, 多用于结构的抗震试验和大型结构试验(如汽车整车试验)。

随着振动测试技术自动化程度的提高, 数据分析处理能力的齐全, 随机振动环境模拟试验可以更有效地进行, 这就大大地提高了环境模拟的精度, 减小了产品在使用中的损坏率, 提高了使用可靠性。另外, 现在还可以控制多个振动台进行随机振动试验。

1.6 结构动力学试验及数据处理技术

包括测试技术、激振技术、数据处理技术等振动测试技术在结构动力学试验中得到了全面的应用和发展。

结构动力学研究涉及到试验模态分析、结构动响应的模拟及仿真、试验模态与解析模态的综合及相关分析、数学模型的修改及结构动力修改设计等, 可归纳为测试方法和计算方法两方面的内容。

(1) 测试方法

测试方法中激振技术是一个很重要的问题, 根据试验目的和数据处理的要求, 可选

用多点激振或单点激振, 可选用接触式激振器或非接触式激振器, 也可利用机械运行中由环境激振产生的振动信号。激振器产生的激振波形直接影响着被测量参数的精度。激振波形有: 离散频率正弦波、慢扫描正弦波、快扫描正弦波、真随机波、周期或伪随机波、猝发随机波以及瞬态波等。每种激振方式和激振波形都有自己的特点, 理论上很难确定哪种最好, 要根据具体场合来选择。

(2) 计算方法

计算方法包括曲线拟合、灵敏度计算以及试验模态综合方法、结构修改算法等。在动力学试验中广泛采用曲线拟合, 要根据试验数据的具体情况选择拟合的方法和参数的最优估计方法。例如, 在作模态参数识别时, 为拟合频率响应函数, 有单模态拟合和多模态拟合两种, 然而并非在任何情况下多模态拟合总能给出好的结果, 在模态不耦合的情况下, 单模态拟合可给出足够的估计精度, 且计算量小。而为了得到“整体”模态参数, 则必须使用频率响应函数矩阵的“整体”拟合方法。

结构动力学试验的发展与数据处理系统的发展密切相关, 或者说是结构动力试验的核心。现代数据处理系统具有以下四方面的明显优点:

(1) 速度快、功能强

多通道分析仪多以 FFT 硬件为基础, 处理速度快, 对周期、瞬态、随机等振动信号可作时域波形分析、频谱分析、相关分析、相干分析、频率响应函数分析等多种分析, 且分析的性能指标在不断地提高, FFT 的计算速度和 A/D 转换速度决定了信号处理的实时能力, 现代信号处理机的实时频率已达到 10kHz 。频率分辨率随着细化技术的发展也在不断地提高, 目前从几十微赫到一百赫可以任意选择。

(2) 与微机结合, 功能不断加强

现有商品化的数据处理系统在结构动力学分析中已可实现试验模态分析与参数识别、结构动力学设计修改、结构动响应仿真、有限元计算等多种功能。

① 试验模态分析与参数识别

由试验测试结构的振动响应信号和激振信号 (或只由振动响应信号), 经数据处理后, 便可计算结构的模态参数 (固有频率、振型、模态阻尼、模态刚度和模态质量等) 和物理参数 (刚度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵的元素或组成这三个矩阵的具体物理量, 如弹性模量、支承弹簧刚度等)。具体的分析方法可分为时域法、频域法和混合法。以频域法为例, 其分析过程大致为: 从测试系统得到的输出信号, 由计算机控制的分析仪进行采样和频谱分析, 得到频率响应函数 (或脉冲响应函数) 矩阵, 提供给计算机, 由模态分析软件对数据进行拟合, 得到模态参数。由模态参数可计算物理参数 (也可直接计算), 还可将得到的模态参数综合成频率响应函数等。

② 结构动力学设计修改

对结构进行了动力分析 (试验的或解析的) 后, 如果不满足设计指标的要求, 则需要对原结构进行修改, 在设计修改过程中可根据原结构动力学特性及其需要的变化量, 利用已有的模态数据, 算出模态参数的修正量, 使最终的结构满足设计要求。整个过程只需要很短的时间便可由计算机完成, 从而使设计过程自动化。

③ 结构动响应仿真

在测得模态参数以后, 便可组成结构的动力学特性函数, 对真实的载荷或假定的载

荷作计算机仿真试验，求其响应。例如，在某一频率下对结构进行正弦激振，使用结构响应仿真软件便可很快地在屏幕上显示出结构振动变形的情况。

(3) 强有力的输入和输出显示

分析结果的显示绘图和存储十分重要，不但可以给人一种清晰的表示，而且是计算机辅助设计 (CAD) 和计算机辅助制造 (CAM) 过程中必不可少的。目前振动数据处理系统的显示内容包括有：被分析结构的形状、“加亮”显示被分析结构的指定部分、不同投影角度上的振型、在荧光屏的不同部位上显示不同振型、重叠显示结构修改前后的振型、振型可以被“动画式”显示等。

(4) 试验研究和理论研究相结合的工具

数据处理系统的微机中已备有用有限元法进行计算的软件，用这种系统可以将理论计算的结果和试验结果进行比较、综合，对理论计算模型加以修改，并可对部分子结构的理论模态和另外部分子结构的试验模态加以模态综合分析。

1.7 振动测试技术的应用和发展中的几个问题

(1) 新型传感器的研究和应用

工程技术的发展对传感器提出了各种特殊的要求，为了适应这些要求，目前急需发展集成电路式传感器、超小型传感器、测量大冲击值传感器、耐高温高辐射环境的传感器、精密型传感器、低频高灵敏度传感器、耐强磁环境的传感器、同时适用于振动、冲击校准用的标准传感器、专门用于测量发动机振动的传感器、具有零频响应的传感器、角振动量传感器、动态压力传感器、各种非接触式传感器等。这当中敏感元件材料和制造工艺是关键。未来的传感器将朝着多功能、整体化方向发展，将具有信号适调、模数转换、记忆等功能，同时可克服离散元件组装带来的麻烦，提高传感器的性能。

其它如信号的远距离传输、多通道的计算机程序控制系统、激光全息测振等也是新近发展起来的与传感器密切有关的新技术。

(2) 各种标准的制订和校准技术的发展

各种新型传感器的发展、各种测试方法的进步必然要求制订一系列相应的标准，为此 ISO/TC108(国际标准化组织/第 108 技术委员会：机械振动与冲击)作了大量的国际标准的制订工作。我国机械振动与冲击标准化技术委员会在尽量采用国际标准的基础上，使这方面的工作在近几年得到了飞速的发展，已制订了十几项国标。

传感器及其配套仪器各项参数的精确度直接影响测量结果。目前除已有的高、中、低频振动校准，大、中、小加速度值冲击校准设备与方法外，超低频校准、特大加速度值冲击校准及各种特殊环境下的复合校准需要作进一步的研究与开发，对适用的比较法校准应作进一步的普及推广。

(3) 声振和综合环境试验

由噪声激励的振动，称为“声振”，例如火箭发动机的喷气噪声就是一个很强的激振源，为了研究这种环境下所引起的振动，就发展了声振环境试验技术，因此必须对引起声振的发声源和声振的测量方法进行研究。在结构动力学特性试验和动响应试验中，用声振可以更真实地模拟分布载荷。