

振动测试与动态分析

张令弥 著

航空工业出版社

振动测试与动态分析

张令弥 著

航空工业出版社

1992

(京)新登字 161^{1/4}号

内 容 提 要

本书以信号与系统分析为基础,结合作者多年来从事振动测试、模态分析与试验等方面的科研实践和所取得的成果,系统、全面地阐述了现代振动测试与动态分析的四个主要内容:振动测量、数据采集、动态信号分析和机械、结构动态特征试验。本书运用当代先进的测试技术和方法,把理论分析、仪器实现和实际应用有机地结合起来,做到深入兼顾,先进实用。

航空工业出版社出版发行
(北京市安定门外小关东里 14 号)
— 邮政编码: 100029 —
全国各地新华书店经售
南京航空学院飞达印刷厂印刷

1992 年 11 月第 1 版	1992 年 11 月第 1 次印刷
开本: 850×1168 毫米 1/32:	印张: 8.50
印数: 1—4000	字数: 191.8 千字
ISBN 7-80046-440-7/TK·004	
定价: 6.50 元	

前 言

在航空、航天、车辆、机械、土木、化工等工程领域，机械振动和结构动力学问题日益突出。振动测试和动态分析已成为机械、结构产品研究、设计、生产和使用、维护中不可或缺的重要手段。随着测试技术向数字化、智能化和计算机化方向的发展，它们发挥着愈来愈重要的作用。

二十年来，作者一直从事振动测试、信号分析和振动模态试验等方面的科研和教学工作。先后承担了一系列理论与应用研究课题，取得多项研究成果。近几年又主持研制了计算机辅助振动测试和分析软、硬件系统，并投入实际使用。80年代以来，为机械振动、固体力学、应用力学、飞机设计等专业研究生开设过多次计算机辅助振动测试技术课程。并应邀在航空、航天、汽车、舰船、机床、土木、兵工等行业为专业技术人员举办过20多次讲习班、短训班。本书结合作者多年研究和教学经验，对振动测试和动态分析有关内容进行归纳、总结，使之成为学科专著，并力图反映当代先进成果。

第一章绪论对振动测试和动态分析的主要内容和特点作了综合评述。信号与系统是本门学科的重要理论基础，作为一条主线贯穿全书，在第二章中进行了详细地阐述。本书第三章至第六章分别讨论振动测试和动态分析的四大主要内容：振动测量、动态数据采集、动态信号分析和机械、结构动态特性测试。

本书主要是为机械、结构有关专业的研究生、高年级本科生以及工程技术人员而写的，要求读者具有高等数学和物理学基础，和一定的机械振动方面的知识。

东南大学汪凤泉教授和我院曾庆华博士在对研究生和在职技术人员讲课时，曾使用过本书的前身——“振动测试与动态分析讲义”，并提出了宝贵的意见。在本书写作过程中，张春宁讲师在动态数据采集和信号分析方面提了有益的建议。本书最后请孙平凡副编审进行全书校阅，对文字作了不少改进。作者对以上同仁的帮助，在此一并表示衷心地感谢。

鉴于水平有限，时间紧凑，书中难免有错误不足之处，敬希读者不吝批评指正。

作者

1992. 4 于南京航空学院

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 信号与系统分析基础	(9)
2.1 确定性信号分析	(9)
2.1.1 周期信号分析·傅里叶级数	(9)
2.1.2 傅里叶级数的指数形式	(16)
2.1.3 非周期信号分析·傅里叶变换	(19)
2.2 随机信号分析	(26)
2.2.1 随机变量及其统计特征	(27)
2.2.2 随机信号的时域分析·相关函数	(31)
2.2.3 随机信号的频域分析·功率谱密度	(36)
2.3 线性系统分析	(43)
2.3.1 拉普拉斯变换	(43)
2.3.2 s域线性系统分析	(49)
2.3.3 时域线性系统分析	(55)
2.3.4 频域线性系统分析	(59)
2.3.5 系统与输入、输出信号的关系	(64)
第三章 振动测量	(70)
3.1 振动传感器	(70)
3.1.1 振动传感器原理	(71)

3. 1. 2	惯性式加速度传感器	(76)
3. 1. 3	速度与位移传感器	(83)
3. 1. 4	动态力传感器	(88)
3. 1. 5	振动传感器的选择与安装	(90)
3. 2	信号适调器	(95)
3. 2. 1	运算放大器、积分器和滤波器	(96)
3. 2. 2	电荷放大器	(102)
3. 2. 3	信号适调器与振动测量仪	(109)
3. 3	振动校准	(112)
3. 3. 1	试验室振动传感器校准	(113)
3. 3. 2	现场振动测量系统校准	(117)
第四章	动态数据采集	(123)
4. 1	动态数据采集原理	(123)
4. 1. 1	采样与频率混迭	(123)
4. 1. 2	量化与动态范围	(127)
4. 2	模拟信号适调	(130)
4. 2. 1	程控放大器	(131)
4. 2. 2	抗混滤波器	(136)
4. 3	模拟信号数字化	(142)
4. 3. 1	采样/保持器 (S/H)	(143)
4. 3. 2	模/数转换器 (A/D)	(147)
4. 4	动态数据采集系统	(152)
4. 4. 1	动态数据采集系统的构成	(153)
4. 4. 2	动态数据采集系统的存贮控制	(157)
第五章	动态信号谱分析	(161)
5. 1	离散傅里叶变换和快速傅里叶变换	(161)

5. 1. 1	离散傅里叶变换 (DFT)	(161)
5. 1. 2	快速傅里叶变换 (FFT)	(168)
5. 2	动态信号谱分析	(171)
5. 2. 1	功率谱密度 (PSD) 估计	(173)
5. 2. 2	泄漏问题	(177)
5. 2. 3	加窗处理	(184)
5. 3	动态信号分析仪器与系统	(189)
5. 3. 1	FFT 的实现	(190)
5. 3. 2	动态信号分析仪器	(194)
5. 3. 3	动态信号分析系统	(198)
5. 3. 4	动态信号分析仪器与系统的使用	(200)
第六章	机械、结构动态特性测试	(205)
6. 1	激振技术	(205)
6. 1. 1	激振方式	(205)
6. 1. 2	激振系统	(212)
6. 2	频率响应函数测试与估计	(220)
6. 2. 1	动态系统频率响应测试	(222)
6. 2. 2	频率响应函数估计	(229)
6. 3	机械、结构试验模态分析	(238)
6. 3. 1	试验模态分析理论基础	(239)
6. 3. 2	模态参数识别·单模态分析	(247)
6. 3. 3	模态参数识别·多模态分析	(254)
6. 3. 4	试验模态分析过程与实施	(261)
参考文献		(266)

第一章 绪 论

振动测试与动态分析在最近二十多年里发展十分迅速,其内容包括三个部分,即振动测量与数据采集,动态信号分析,以及机械、结构动态特性试验。

在工程中有很多物理量是随时间变化的,例如机械、结构振动的位移、速度、加速度;冲击的加速度;噪声的声压和声强……等等。这些参数称为动态参数。动态测量是指由传感器测得这些非电物理量并转变为电信号,然后经过放大、滤波等适调环节,对信号作适当调节,对测量结果进行显示、记录的全过程。振动测量属于动态测量范围,如图 1-1 所示。

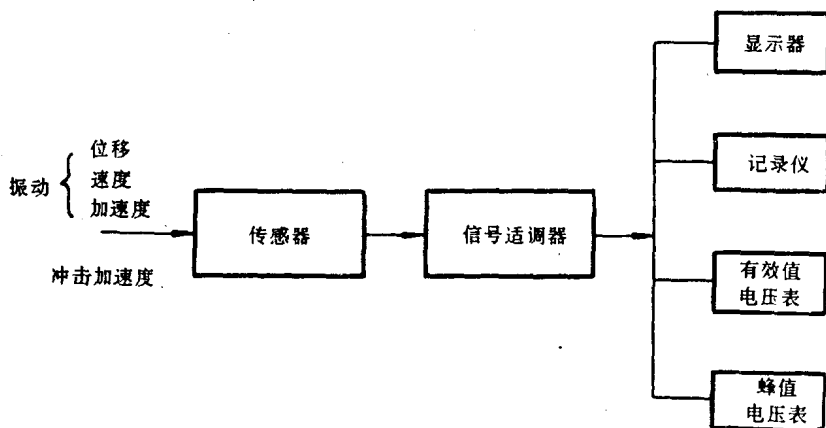


图 1-1 振动测量框图

工程中的动态物理量都是随时间连续变化的,相应的连续时

间信号称为模拟信号。为了提高测量的精度和速度,便于对信号作进一步分析处理,往往需要将模拟信号转变为离散的数字信号。将连续时间信号转变为离散数字信号的过程称为数据采集。具体方法是,首先将连续变化的信号在时间域离散化,即采样。然后将时间域离散、幅值域连续的信号转变为幅值域也离散的数字信号,即进行量化或模/数转换。时域采样,将产生一个所谓频率混迭的问题,导致偏度误差;幅值域量化,又有一个信号噪声比的问题,引起随机误差。为了保证数据采集的精度,对采集前的模拟信号适调提出了更高的要求。即放大器应有自动量程功能(这种放大器称为程控放大器或自动量程放大器),以便充分利用模/数转换器的动态范围;滤波器应尽量接近理想低通滤波器的特性,以避免采样引起的频率混迭(这种低通滤波器称为抗混滤波器)。图 1-2 给出了多通道动态数据采集的框图。

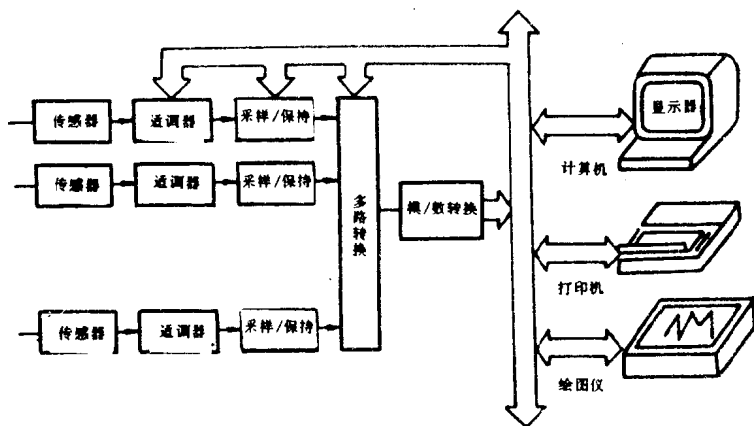


图 1-2 动态数据采集框图

对于振动、冲击等快变物理量,所测量的随时间变化的信号(时间历程)尚不足以描述其特征,而有效值、峰值等参数反映的信息量又太少。因此,对所测得的动态信号往往需要进行分析。动态

信号分析的主要手段是将在时间域变化的信号变换为在频率域中有效值或均方值随频率的分布,后者又经常称为谱分析。对有限长信号的谱分析将产生所谓功率泄漏的问题,导致分析结果的严重偏度误差。因而需要寻求降低泄漏的措施,例如对时域信号进行加窗处理等。为了减小谱分析中的随机误差,通常还要用到平均等统计处理手段。动态信号分析除频域分析之外,还有时域分析(如相关函数分析等)和幅域分析(如直方图、概率密度和概率分布函数分析等)。

现代动态信号分析主要采用数字方法,可以由软件在通用计算机上实现,也可以用专用硬件做成仪器完成。动态信号分析的核心是离散傅里叶变换,尽管可以通过快速算法(快速傅里叶变换FFT)来实现,但仍有很大运算处理工作量。近十年发展的数字信号处理器(DSP)为FFT和加窗处理等信号分析提供了新的物质基础,开辟了软、硬件结合的动态信号处理的新途径。显然,不论采用哪种实现方式,数据采集都是数字信号分析不可或缺的组成部分(图1-3)。

实际测量、分析的物理量,往往是被试对象(机械、结构等系统)在一定运行环境中受到某种激励的动态响应。它能反映实际对象在运行中的动态行为,也能在某种程度上反映被试系统的动态性能。如果系统是线性的(工程中大多数实际系统可用线性系统描述)激励和响应,即系统的输入、输出之间存在着简单的因果关系(图1-4),因此可以通过对被试系统输入、输出物理量的测量和分析来确定系统的动态特性,这就是动态特性试验。

频率响应函数是线性系统在频域中动态特性的描述,它既可以通过理论分析方法由系统的传递函数求出,也可以由动态特性试验方法得到。此外,由频率响应函数,还可以很容易地求出系统动态特性在时域的描述——脉冲响应函数。因而频率响应函数测试成为动态特性试验的主要内容之一。频率响应函数可以看成是描述

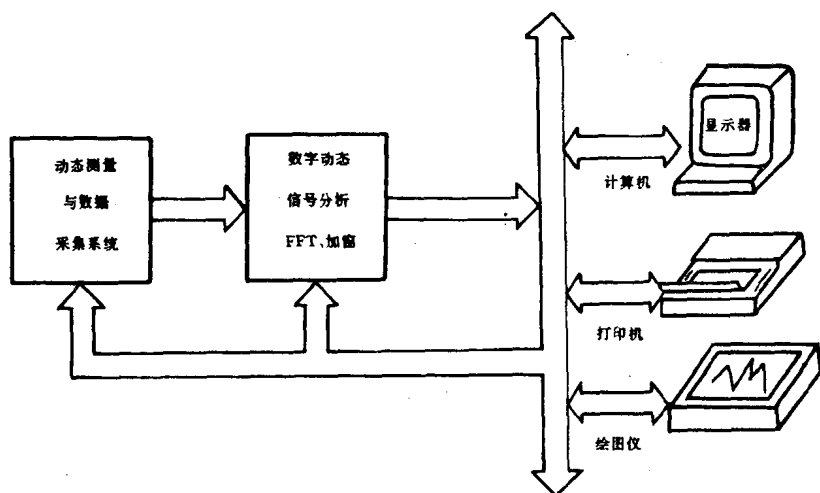
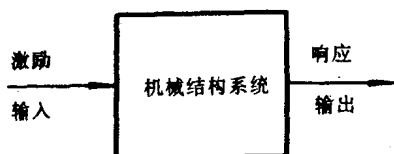


图 1-3 动态信号分析过程示意图

线性系统的非参数模型(由频率响应数据或曲线来表示),它的测试问题实际上是一个非参数模型的估计问题。



对于机械、结构等力学系统,其动态特性常用固有频率、阻尼比和振型等所谓模态参数来描述。图 1-4 线性系统输入—输出关系

在频率响应函数测试的基础上,还可以通过参数识别的方法,即试验模态分析,来建立机械、结构的参数模型。

为了对机械、结构系统进行动态特性测试,首先要对被试系统进行激励,即通过激振系统对被试机械、结构施加一定形式和大小 的激振力。然后对系统响应进行测量和信号分析。显然,测量、采集系统和动态信号分析系统都是动态特性试验系统的重要组成部分。图 1-5 为现代计算机辅助动态试验系统的原理框图。计算机既能产生多种激励信号,通过激振器对试件施加激振力,又能对数据

采集和信号分析系统进行控制。与此同时,计算机还具有强大的分析功能,可以实现频率响应估计和振动模态参数识别。

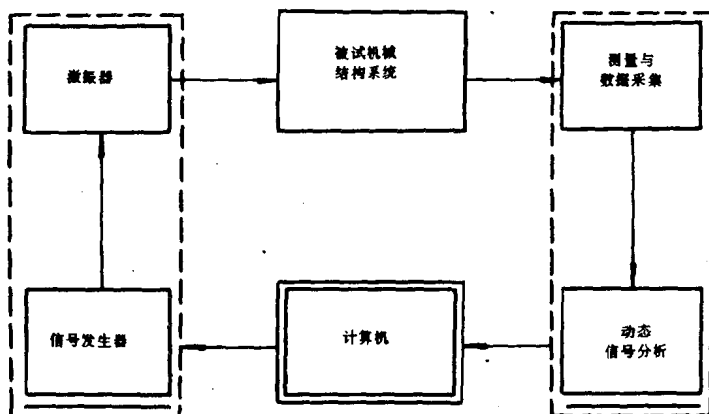


图 1-5 机械结构动态特性测试

如上所述,振动测试与动态分析的三部分内容包含了三个层次。振动测试,包含振动测量与数据采集以及机械结构动态试验两部分。动态分析既是指动态信号分析,也是指对被试系统的动态特性分析。

振动测试与动态分析技术包括原理(理论、方法)和实现(仪器、设备)两个方面。本书将以此为重点,并将这两个方面内容有机地联系在一起,其目的在于应用。

“信号”是贯穿本书的一条主线。振动测量和信号分析的过程,实质上也是信号获取、传递、变换、存贮和处理的过程,广义上属于信息论的范畴。信号可以分为确定性信号和随机信号两大类。通过傅里叶级数展开和傅里叶变换的方法,可以分别将确定性的周期和非周期信号变换成频域中的频谱,实现线性谱分析。随机信号属于随机过程,对其分析处理的理论基础是概率统计。在随机信号谱分析中,傅里叶变换也是必不可少的主要工具。通过傅里叶变

换,可以得到信号的均方谱,即功率谱。通过傅里叶反变换,可以由功率谱求出随机信号在时域的描述——相关函数。工程中的信号一般是随时间连续变化的模拟量,在信号分析中,需将模拟信号离散化为数字量。数字信号分析的数学工具是离散傅里叶变换。

“系统”是贯穿本书的另一条主线。实现振动测量、数据采集、动态信号分析以及动态特性试验的仪器设备本身都是动态系统——电学系统(如放大器、滤波器等)和机/电系统(传感器、激振器等)。被试的机械、结构则是典型的力学系统。动态系统分析属系统论的范畴。对于工程中常见的线性系统,其理论基础是微分方程和拉普拉斯变换。描述线性系统动态特性的基本工具则是传递函数,频域中的频率响应函数和时域中的脉冲响应函数。通过线性系统分析,可以确定系统的动态特性和系统输入、输出信号之间的关系,这是系统动态特性测试的基础。

频率响应函数等动态特性测试问题,实质上是一个非参数模型的估计问题,其理论基础是估计理论。本书则主要采用工程中最常用的最小二乘估计方法。由频率响应函数进一步可以得到描述机械、结构动态特性的模态参数,属参数识别问题。本书对参数识别中的一些优化方法将作适当介绍。

以上是振动测试与动态分析技术中的主要理论方法问题。

振动测试与动态分析的仪器设备在近十年中发展十分迅速,大体可分成模拟式、数字式和计算机辅助式三个阶段。

50 和 60 年代,在振动测试和动态分析中,基本上是模拟量仪器设备的一统天下。由于数字化仪表读数精度高、分辨率强,首先进入振动测量系统的显示部分。实际上是由直流电压表显示被测量的有效值或峰值等参数。由于高速度和多通道测量的要求,70 年代开始,在动态测量(包括振动测量)中广泛应用数据采集系统。随着离散傅里叶变换的快速算法(FFT)的出现,微电子技术和小型计算机的发展,70 年代后期,动态信号分析进入了数字化的新

纪元,产生了硬件化的动态信号分析仪(又称 FFT 分析仪)和基于小型计算机的动态信号分析系统。

小型计算机(Minicomputer)的发展,使计算机在 70 年代后期大踏步进入试验室,产生了以计算机为控制器(Controller)的数据采集系统和动态信号分析系统,以及计算机辅助动态测试(CAT)系统。80 年代以来,随着 16 位、32 位微型计算机(Microcomputer)的出现和性能价格比的不断提高,计算机辅助动态测试系统进入了一个新的阶段,并获得愈来愈广泛的应用。

在数据采集中,计算机不仅对采集过程进行控制,而且还能随意对采集的结果进行存取,以及作进一步数据处理;在动态信号分析中,有了计算机和相应的信号分析软件,可以很方便地实现多通道信号分析以及图形显示和数据管理。计算机的高速度、大容量,为信号分析开辟了广阔的天地;在机械、结构动态特性测试中,计算机成为系统的核心,不仅可产生多种激励信号,通过激振器对被试系统进行激振,对数据采集和数字信号处理进行控制,而且可以对系统动态特性(如频率响应函数)进行各种估计,并进而识别系统参数,建立被试系统的数学模型。CAT 系统将动态特性测试推向一个新的高度。

需要说明的是,无论是数字化或计算机辅助测试分析,模拟式的传感器、信号适调器以及激振系统,仍然是必不可少的。在计算机辅助动态测试系统中,它们构成了所谓测试前端。

本书是作为振动工程学科(包括固体力学和一般力学学科中的振动方向,以及振动、冲击、噪声学科)研究生用讲义而编著的。也适合于航空、机械等工程专业研究生、高年级学生和工程技术人员。振动测量和动态特性试验虽有特殊性,但属于动态测试范畴,对非振动学科也有很多共性的地方。动态分析则具备更大的共性。因此本书也可供电气类和控制类专业人员参考。

本书作为试验类课程,容量为课内 40 学时左右,在内容上力

求系统全面,但不可能面面俱到。振动测试与动态分析的进一步内容,如振动环境试验、机械状态监测与故障诊断等,有专门课程和教材介绍。对于动态特性测试中的模态参数识别,深入的讨论也将在后续课程——机械系统参数识别或振动试验模态分析中进行。但本课程将为进一步学习和研究打下良好的基础。

第二章 信号与系统分析基础

2.1 确定性信号分析

动态信号一般可以分为确定性和非确定性两大类。能够用明确的数学关系式描述的信号称为确定性信号。例如,弹性系统自由振动,不平衡旋转机械的振动响应,直升机旋翼或旋转叶片机械气动弹性振动等产生的信号,基本上都是确定性信号。但是,也有许多信号不是确定性的。例如,大气紊流对飞机结构的激励,海浪对水中结构的激励,路面对汽车的激励,以及由此而产生的响应,信号中电子噪声的影响等,都不能用明确的数学关系式来描述,无法预测未来某时刻的精确值。这类物理现象的观测信号在性质上是随机的,只能用概率和统计方法来描述。对于大多数实际工程中所遇到的信号则往往既有确定性成分又有随机成分。

确定性信号,可以分为周期和非周期两类。周期信号的特例是可以用正弦(或余弦)函数描述的简谐信号。瞬态信号则是典型的非周期信号。

信号分析的主要内容是,将信号的时间历程用更能显示信号特点的频谱来表示,即实现由时间域(时域)到频率域(频域)的变换。周期信号可由傅里叶级数变成离散频谱,非周期信号则可通过傅里叶变换变成连续频谱。

本节主要讨论确定性信号分析及其数学工具——傅里叶级数和傅里叶变换。

2.1.1 周期信号分析·傅里叶级数

最简单的确定性信号是简谐信号,可用正弦实函数表示