



航天科技图书出版基金资助出版

结构振动理论及 火箭截面载荷识别

尹云玉 编著



中国宇航出版社

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

结构振动理论及火箭截面载荷识别 / 尹云玉编著. —北京: 中国宇航出版社, 2011. 2

ISBN 978 - 7 - 80218 - 922 - 5

I. ①结… II. ①尹… III. ①火箭—结构振动 ②火箭—载荷
IV. ①V421

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 025322 号

责任编辑 阎 列 责任校对 陈 琳 封面设计 宇航数码

出 版
发 行

中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830
(010) 68768548

网 址 www.caphbook.com / www.caphbook.com.cn

经 销 新华书店

发行部 (010) 68371900 (010) 88530478 (传真)
(010) 68768541 (010) 68767294 (传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010) 68371105 (010) 62529336

承 印 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2011 年 2 月第 1 版 2011 年 2 月第 1 次印刷

规 格 880×1230 开 本 1 / 32

印 张 16.25 字 数 452 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 80218 - 922 - 5

定 价 80.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

序

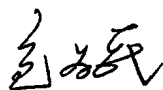
振动就是物体的往复运动。振动（包括波动）是物质世界里一种普遍现象，是物质运动的基本形式之一。人体的许多器官时刻都处于振动状态，如心脏的跳动、脉搏的搏动、耳膜和声带的振动等。在不同领域，广泛存在着振动，如坦克、汽车、火车、舰船、飞机、火箭、卫星及机械设备的振动，家用电器、钟表的振动，给人类带来灾害的地震等。

振动可分为有害振动和有用振动。有害振动会使物体变形、磨损或破坏，会使精密仪表精度降低。过大的振动会使电子仪器失灵，甚至会使机械设备、桥梁结构、飞机及火箭遭到破坏，地震会使人民生命财产遭受巨大损失等。但是振动也有诸多的用途，合理地利用振动能改善人民的生活，给人类造福。例如机械式钟表、各种乐器、振动传输机械、诊断及治疗疾病的超声波设备等都是利用振动特性的产物。

为了最大可能地抑制有害振动，有效地利用有用振动，就需要研究振动的机理，揭示振动的内在规律及其外部影响因素，进而采取有效措施，对振动实行有效抑制及利用。由此可见，人类对振动理论的研究不可或缺。

振动是力学的一个重要分支，涉及的内容非常广泛，从事相关研究的人员也很多，有关资料更是十分丰富，但方便火箭结构动力学设计工作者使用的书籍还不多见。本书较详细地介绍了结构振动理论各方面知识，列出了大量具体计算程序，可加深读者对结构振动理论的理解。特别是在支撑刚度变化对纵向受力时变弹性梁横向

弯矩的影响分析、火箭自由—自由飞行状态截面弯矩识别方法等方面具有突出的特点，为火箭结构动力学研究提供了有价值的技术途径，相信会对火箭结构动力学计算、振动理论研究产生一定的影响。



中国科学院院士
中国航天科技集团公司科技委主任

前 言

本书从工程实际出发,介绍了结构振动理论及信号处理的相关知识,包含单自由度系统振动理论、多自由度系统的振动、无限自由度系统振动及有限元法应用、非线性振动、随机振动、平稳随机信号处理方法、冲击响应谱、模态参数的时域识别方法、火箭截面载荷识别、MATLAB程序设计基础等内容,使读者通过本书能全面掌握火箭动力学研究的全过程,并能解决一些火箭动力学、载荷设计的基本问题。本书作者从事火箭结构动力学、载荷、力学环境设计多年,完成过多项重点项目的动力学、载荷、力学环境设计。此书融入了作者多年从事工程设计的体会和经验,希望能为促进火箭动力学、载荷、力学环境设计技术的提高,起到抛砖引玉的作用。

宁波大学竺润祥教授在百忙之中审阅和修改了全部书稿,给作者提供了大力支持和帮助,使本书的出版得以实现,作者在此表示衷心的感谢!同时,作者在写作过程中阅读和参考了大量文献,在此也对原作者表示诚挚的感谢!

本书可供从事火箭结构动力学、载荷、力学环境设计的专业人员和相关专业的科技人员及有关高等院校师生参考。

由于作者水平有限,书中差错在所难免,恳请读者批评指正。

作 者
2010年10月

目 录

第一篇 结构振动理论

第 1 章 引言	3
1.1 振动的基本概念	3
1.2 结构振动分类	4
1.2.1 按引起振动的的原因分类	4
1.2.2 按振动的规律分类	4
1.2.3 按系统的自由度分类	5
1.2.4 按描述系统运动的微分方程分类	5
1.3 系统运动方程的建立	6
第 2 章 单自由度系统振动	8
2.1 单自由度系统的自由振动	8
2.2 单自由度系统在谐振力作用下的动力响应	19
2.3 有阻尼单自由度系统的动力响应系数	35
2.4 有阻尼单自由度系统受偏心质量作用的动力响应	39
2.5 有阻尼单自由度系统在谐振力作用下的传递率	41
2.6 单自由度系统对任意激励作用下的动力响应	45
2.7 单自由度系统在脉冲激励作用下的动力响应	57
2.7.1 矩形脉冲激励下的动力响应	57
2.7.2 半正弦脉冲激励下的动力响应	64
2.7.3 对称三角形脉冲激励下的动力响应	74

2.7.4	直角三角形脉冲激励下的动力响应	80
2.8	单自由度系统动力响应的数值求解方法	83
2.8.1	数值求解方法简介	83
2.8.2	基于激励函数插值的方法	84
2.8.3	中心差分法	90
2.8.4	基于时间步进法的 Newmark 方法族	96
第3章	多自由度系统振动	106
3.1	二自由度系统运动方程	106
3.2	二自由度无阻尼系统的自由振动	108
3.3	多自由度无阻尼系统的自由振动	110
3.3.1	固有振动频率和振型	110
3.3.2	自由振动响应	115
3.4	多自由度系统的强迫响应	122
3.4.1	振型叠加法	122
3.4.2	直接积分法	125
3.5	固有特性数值计算	126
3.5.1	全部特征值固有特性计算	127
3.5.2	子空间迭代法	132
3.5.3	利用 FORTRAN 语言编制子空间迭代法计算 程序	135
第4章	无限自由度系统振动及有限元法应用	177
4.1	无限自由度系统振动	177
4.1.1	杆的纵向振动	177
4.1.2	梁的横向弯曲自由振动	180
4.1.3	无限自由度系统的强迫振动	186
4.1.4	考虑了剪切变形后梁的弯曲振动	188
4.2	有限元法	191

4.2.1 有限元法的基本概念	191
4.2.2 有限元法分析计算的思路和做法	194
4.2.3 有限元法现况	205
4.3 有限元法求振动特性及动响应	208
第5章 非线性振动	220
5.1 非线性振动基本概念	220
5.2 弱非线性系统振动响应计算方法介绍	228
5.3 考虑几何非线性的刚度矩阵	229
5.3.1 几何刚度的定义	229
5.3.2 结构的 $P-\Delta$ 效应	231
5.4 考虑剪切变形的受纵向载荷作用下弹性梁动响应 计算理论	232
5.4.1 受纵向载荷作用下弹性梁动响应计算理论	232
5.4.2 受纵向载荷作用下弹性梁动响应计算方法	237
5.5 支撑刚度变化对纵向受力时变弹性梁横向弯矩的 影响分析	243
第6章 随机振动理论	289
6.1 随机振动的基本概念	289
6.2 随机变量的概率统计特征	291
6.3 谱分析相关概念	293
6.4 单自由度结构的随机响应	295
6.4.1 时域脉冲响应法	295
6.4.2 频率响应法	296
6.5 单自由度结构的随机响应	298
6.6 多自由度和无限自由度结构的随机响应	299
6.7 随机振动参数的表达方式	300

第二篇 信号处理与火箭截面载荷识别

第7章 平稳随机信号处理方法	305
7.1 动力学测量传感器	305
7.2 滤波器设计及分析	306
7.2.1 滤波的基本概念	306
7.2.2 模拟滤波器	307
7.2.3 数字滤波器	308
7.2.4 滤波器设计函数	309
7.3 傅里叶变换	324
7.3.1 傅里叶变换基本概念	324
7.3.2 傅里叶级数展开	325
7.3.3 连续傅里叶变换	325
7.3.4 快速傅里叶变换	326
7.4 功率谱密度计算	329
7.4.1 自功率谱密度函数	330
7.4.2 互功率谱密度函数	330
7.4.3 频率响应函数(频响函数)	331
7.4.4 相干函数(凝聚函数)	331
7.4.5 信号处理实例	332
第8章 冲击响应谱	342
8.1 冲击的基本概念	342
8.2 冲击响应谱概述	343
8.2.1 冲击响应谱定义	343
8.2.2 响应谱的种类	344
8.3 冲击响应谱计算	345
8.3.1 基于激励插值的冲击响应谱计算	345

8.3.2	利用积分函数进行冲击响应谱计算	347
8.3.3	利用 Newmark 方法进行冲击响应谱计算	353
第 9 章	模态参数的时域识别方法	367
9.1	时域识别方法的特点	367
9.2	随机减量法	368
9.3	NExT 法	374
9.4	ARMA 模型时间序列分析法	378
9.5	STD 法模态参数识别法	386
第 10 章	火箭截面载荷识别	393
10.1	火箭截面载荷识别的基本概念	393
10.2	小波分析	394
10.2.1	小波分析简介	394
10.2.2	小波变换定义	397
10.2.3	连续小波变换的物理意义	398
10.2.4	连续小波变换的基本性质	404
10.2.5	离散小波变换	405
10.2.6	函数空间与测不准原理	406
10.2.7	几种常用小波	408
10.3	火箭截面载荷辨识的基础	414
10.3.1	刚体模态运动数据处理	414
10.3.2	最小二乘法拟合	416
10.4	火箭截面弯矩识别方法	420
10.4.1	利用遥测过载参数的小波分解及模态叠加法 识别弯矩	420
10.4.2	利用小波滤波及最小二乘法求广义位移的方法 来识别截面弯矩	428
10.4.3	截面弯矩识别实例	441

附录 A MATLAB 程序设计基础	459
A. 1 概述	459
A. 2 MATLAB 语言基础	461
A. 2. 1 MATLAB 语言环境	461
A. 2. 2 MATLAB6. 5 变量和表达式	463
A. 2. 3 数组的产生	464
A. 2. 4 常用的数学函数	467
A. 2. 5 数组的运算	469
A. 2. 6 数组的扩展及转换	475
A. 2. 7 MATLAB 中关系运算符	481
A. 2. 8 MATLAB 控制语句	482
A. 3 输入及输出	487
A. 3. 1 交互式输入	487
A. 3. 2 输出格式	488
A. 4 储存及读取数据	489
A. 4. 1 save 和 load 命令	489
A. 4. 2 其他数据输入输出命令 importdata textread	493
A. 5 简易绘图	495
A. 6 其他绘图功能	497
A. 7 绘图选项	498
A. 7. 1 横轴和纵轴的控制	498
A. 7. 2 子图	499
A. 7. 3 图形放大及缩小	500
A. 7. 4 函数分布的快速绘图	500
A. 7. 5 其他功能	500
A. 8 三维绘图	501
A. 8. 1 三维的曲线绘图	501
A. 8. 2 曲面及等值线绘图	501
参考文献	503

第一篇 结构振动理论

第 1 章 引 言

1.1 振动的基本概念

所谓振动,就是物体或某种状态随时间作往复变化的现象。振动包括机械振动与非机械振动。例如,钟摆的来回摆动,房屋由于风力、地震或机械设备引起的振动,桥梁由于车辆通过引起的振动,发动机工作引起的振动,以及水坝、闸门的振动等属于机械振动;另一类属于非机械振动,例如声波、光波、电磁波等。振动研究涉及的对象非常丰富,在机械及工程结构方面存在大量的振动现象。

从广义上说,振动是指描述系统状态的参量(如位移、加速度、电压)在其基准值上下交替变化的过程。狭义的振动指机械振动,即力学系统中的振动。电磁振动习惯上称为振荡。力学系统要能维持振动,必须具有弹性和惯性。由于弹性,系统偏离其平衡位置时,会产生回复力,促使系统返回原来位置;由于惯性,系统在返回平衡位置的过程中积累了动能,从而使系统越过平衡位置向另一侧运动。正是由于弹性和惯性的相互影响,才造成系统的振动。

振动是自然界和工程界常见的现象,也是物质运动的基本形式之一。振动的消极作用是影响仪器设备的功能,降低机械设备的工作精度,加剧构件磨损,甚至引起结构疲劳破坏;振动的积极作用是存在许多需利用振动的设备和工艺(如振动传输、振动研磨、振动沉桩等)。振动分析的基本任务是讨论系统的激励(即输入,指系统的外来扰动,又称干扰)、响应(即输出,指系统受激励后的反应)和系统动态特性(或物理参数)三者之间的关系。20 世纪 60 年代以后,计算机和振动测试技术取得重大进展,为综合利用分析、试验和计算方法解决振动问题开拓了广阔的前景。

1.2 结构振动分类

根据要素(惯性、复原性、阻尼)不同及外界的激励不同,可将工程振动分为以下几类。

1.2.1 按引起振动的原因分类

(1) 自由振动

自由振动是指当系统仅仅受到一个初始干扰(初速度或初位移)、或者原有的外激励取消后,系统仅在自身的惯性力与恢复力作用下的振动。

(2) 强迫振动

强迫振动是指系统在一个持续的外激励作用下引起的振动。

(3) 自激振动

自激振动是指系统在输入和输出之间具有反馈特性,并有能源补充而产生的振动。

1.2.2 按振动的规律分类

(1) 简谐振动

简谐振动的振动量为时间的正弦或余弦函数。它是一种最简单的周期振动,也是分析任意周期振动的基础。

(2) 周期性振动

周期性振动的振动量为时间的周期函数,即每隔一定时间重复出现原来形状的波形,但又不是简谐振动。这种振动可用谐波分析的方法将其展开为一系列简谐振动的叠加。按照级数理论,任意一个周期函数只要满足一定条件,都可按傅里叶(Fourier)级数把它展开为一系列简谐函数之和,又称为谐波分析。

(3) 瞬态振动

如果振动量为时间的非周期函数,通常只在一定的时间内存在,

称之为瞬态振动。如脉冲、阶跃激励等引起的振动。

(4) 随机振动

随机振动的振动量不是时间的确定性函数，因而不能预测，只能用概率统计的方法来研究。

1.2.3 按系统的自由度分类

在振动分析中，用以描述系统所需要的独立坐标数目，称为系统的自由度。

(1) 单自由度系统振动

用一个独立坐标就能确定的系统的振动，称为单自由度系统振动。

(2) 多自由度系统振动

用两个以上的多个独立坐标才能确定的系统的振动，称为多自由度系统振动。

(3) 弹性体振动

需用无限多个独立坐标(位移函数)才能确定的系统的振动，称为弹性体振动。

1.2.4 按描述系统运动的微分方程分类

(1) 线性振动

线性振动用常系数线性微分方程来描述。此时，惯性力、阻尼力及弹性力只分别与加速度、速度和位移成正比。

(2) 非线性振动

非线性振动用非线性微分方程来描述，即在微分方程中出现非线性项。

振动分析中经常用到频率、周期和广义坐标等基本概念。单位时间(如秒)内，重复出现的相同运动次数称为频率(f)，其单位为每秒出现的次数，称为赫兹(Hz)。出现两次相同运动间的时间间隔称为周期(T)。频率 f 和周期 T 之间的关系为 $f=1/T$ 。