

结构动力学

〔美〕 Roy R. Craig, Jr 著

常 岭

翻译

李振邦

常 岭

校核

人民交通出版社



结构动力学

Jiegou Donglixue

[美] Roy R. Craig, Jr 著

常 岭

翻译

李振邦

常 岭

校核



人民交通出版社

内 容 提 要

本书可作为航天工程、土木工程、机械工程及工程力学等不同学科专业的研究人员、工程技术人员、教师和学生从事结构、机械动力方面研究、设计、教学、试验与自学用的一部基本理论知识的标准教材与参考用书。本书理论系统性强、内容精练、涉及面广、深浅适度。

本书重点是动力分析的基本原理与求解的方法,在每章中都编排了许多不同专业的例题以陈述本章的要领;并布置了适当的作业练习加以巩固,在每章的开头都安排了本章的内容提要以适应读者自学。

本书特点侧重于结构数学模拟;广泛介绍 SDOF、MDOF 系统固有频率与模态、各种运动中的瞬态响应、复频响应的数值计算方法,介绍了结构动力分析的有限元法和一种实用的分量模态综合。介绍教学用的矩阵处理和有限元计算机程序编辑。对于非线性问题和随机振动分析的基础知识做了适当的介绍。本书最后一章介绍了工程抗震的概念。

本书由常岭、李振邦翻译,由常岭对本书做了全部校核。

本书为 John Wiley & Sons, Inc. 独家授权的中文版本。本书专有出版版权属人民交通出版社所有。本书原版版权属 John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. Authorized translation from English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

(京)著作权合同登记章 图字:01—96—1233 号

图书在版编目(CIP)数据

结构动力学/常岭,李振邦翻译.—北京:人民交通出版社,1995.12
ISBN 7-114-02252-2

I. 结… II. ①常…②李… III. 结构动力学 IV. 0342
中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 18451 号

结构动力学

[美]RorR. Craig, Jr. 著

常 岭 李振邦 翻译

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

北京市管庄永胜印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:25 字数:627 千

1996 年 12 月 第 1 版

1996 年 12 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—2600 册 定价:36.00 元

ISBN 7-114-02252-2

TU·00041

前 言

结构动力学这门学科在过去的二十多年中曾经历了深刻的变革,其原因是数字计算机的问世带来了结构动力学问题的数值解。目前,广泛地应用了快速傅立叶变换(FFT),促使结构动力分析发生了更加深刻的变化,而且使得结构动力分析与结构动力试验间的相互关系也开始得以沟通。本书包括了许多材料,已成为机械振动或结构动力学的一本标准教科书。然而本书还有一个目的,就是为工程技术人员提供一些所需要的基础知识,使技术人员能够使用结构动力计算机程序,会做结构动力试验,接受有限元分析及结构动力学这些现代课程的基础知识。

尽管结构动力学应用在不同的学科中,诸如航天工程、土木工程、工程力学以及机械工程;然而其原理以及解题方法等是基本相通的。因此本书的重点是放在基本原理与求解方法方面;并安排了许多例题来加以说明,而且还根据不同的工程科目布置了适当的作业练习。

本书的主要特点包括:侧重于结构的数学模拟,并以试验的方法来验证数学模型;广泛介绍计算固有频率与振型以及计算瞬态响应的数值方法;系统地介绍结构动力分析中有限元法的应用;单自由度系统和多自由度系统复频响应表示法的应用;计算响应的振型位移法与振型加速度法的振型叠加形式;介绍一种实用的分量模态综合方法的动力分析;以及介绍教学用的矩阵处理和有限元的计算机程序编辑 **ISMIS** (Interactive Structures and Matrix Interpretive System),以便解结构的动力问题。

尽管本书的重点是放在结构动力学中的线性问题上,但是也还适当地介绍了一些结构动力问题中的非线性解的方法。另外,随机振动的题目不准备在这里讨论,因为这无疑已超出了本书所要研究的内容;如果是粗略地介绍一下,则会立即削弱了在结构动力分析中所强调的数值方法。但是希望在本书中安排些随机振动资料的读者会发觉,本书中的复频响应资料会使得在研究随机振动时,成为很有用处的基础知识。

本书的基本目的是想通过介绍数值方法给学生的有限元计算机程序编辑打下基础。这些基本上是通过手算,并以 **FORTRAN** (或 **BASIC**) 语言编几个子程序。使用 **ISMIS** 计算机程序能够扩大学生的解题能力;而且使用 **ISMIS** 计算机程序可以回避用有限元编辑程序的那部分“黑盒子”。虽然在第 10 章与第 17 章中使用了 **ISMIS** 计算机程序,但不是说必须强制去使用它。

计算机制图已开始在结构动力学中起了很重要的作用,例如车辆碰撞的计算与模拟,并能显示出栩栩如生的结构振型。本书的一大特点就是全部插图即描绘函数的表达式是直接计算机生成的。

这本书作为大学高年级学生在一个学期内结构动力学课程所使用的教科书;或是作为研究生结构动力学中计算方法的一个学期课程的教科书。适用于大学生的代表性课程的内容有:第 1 章至第 6 章,§ 9.9、§ 9.2、§ 10.1、§ 10.2、§ 11.1 至 § 11.4,以及第 12 章。研究生是复习以上内容(假定学生已具有以前学过的机械振动或结构动力学的课程);如果时间允许、可进行本书中剩下的课题。大学生和研究生的课程都可应用 **ISMIS** 计算机程序。研究生的课程还要包括几个 **FORTRAN** 程序编辑练习。

作为大学生结构动力学的课程,应按照自己的实际情况来进修这本书的有关章节,因此在每一章的开头都客观地介绍了本章的要点,并广泛地选用了一批例题。因此,本书对于从事结构动力学研究以自学为基础的工程技术人员来说,亦是一本非常有用的书。

目 录

第 1 章 结构动力学的科学与技巧	(3)
§ 1.1 结构动力学引言	(3)
§ 1.2 结构动力特性分析	(4)
§ 1.3 结构动力试验	(8)
§ 1.4 本书范围	(8)

I 单自由度系统

第 2 章 SDOF 系统数学模型	(12)
§ 2.1 杆件的集总参数模型	(12)
§ 2.2 集总参数模型的牛顿定律应用	(14)
§ 2.3 集总参数模型的虚位移原理应用	(20)
§ 2.4 连续模型的虚位移原理应用——假定振型法	(25)
第 3 章 SDOF 系统自由振动	(37)
§ 3.1 无阻尼 SDOF 系统自由振动	(38)
§ 3.2 粘滞阻尼 SDOF 系统自由振动	(41)
§ 3.3 试验确定 SDOF 系统的固有频率和阻尼因数	(44)
§ 3.4 库伦阻尼 SDOF 系统自由振动	(49)
第 4 章 SDOF 系统简谐激励响应	(54)
§ 4.1 无阻尼 SDOF 系统简谐激励响应	(54)
§ 4.2 粘滞阻尼 SDOF 系统简谐激励响应	(58)
§ 4.3 复频响应	(63)
§ 4.4 隔振——力的可传性和基础运动	(65)
§ 4.5 振动测试仪器	(69)
§ 4.6 频响数据确定弱阻尼 SDOF 系统的固有频率和阻尼因数	(71)
§ 4.7 等效粘滞阻尼	(73)
§ 4.8 结构阻尼	(75)
第 5 章 SDOF 系统特殊形式激励响应	(84)

§ 5.1	粘滞阻尼 SDOF 系统理想阶跃输入响应	(84)
§ 5.2	无阻尼 SDOF 系统矩形脉冲与斜坡荷载响应	(85)
§ 5.3	无阻尼 SDOF 系统短时作用脉冲响应——单位脉冲响应	(88)
第 6 章	SDOF 系统一般动力激励响应	(93)
§ 6.1	SDOF 系统一般动力激励响应——杜哈梅积分法	(93)
§ 6.2	反应谱	(96)
第 7 章	SDOF 系统动力响应数值计算	(105)
§ 7.1	激励函数插值数值解	(105)
§ 7.2	近似导数数值解——逐步数值积分	(110)
§ 7.3	非线性 SDOF 系统	(112)
§ 7.4	非线性 SDOF 系统响应逐步数值解	(115)
第 8 章	SDOF 系统周期激励响应——频域分析	(121)
§ 8.1	周期激励响应——实数型傅立叶级数	(121)
§ 8.2	周期激励响应——复数型傅立叶级数	(126)
§ 8.3	非周期激励响应——傅立叶积分	(130)
§ 8.4	复频响应与单位脉冲响应关系	(133)
§ 8.5	离散傅立叶变换(DFT)与快速傅立叶变换(FFT)	(134)

II 连续系统

第 9 章	连续系统数学模型	(141)
§ 9.1	牛顿定律应用——轴向变形	(141)
§ 9.2	牛顿定律应用——线弹性梁横向振动(伯努利-欧拉理论)	(143)
§ 9.3	哈密顿原理应用	(148)
§ 9.4	哈密顿原理应用——梁弯曲包括剪切变形与转动惯量(铁木辛科梁理论) ...	(150)
第 10 章	连续系统自由振动	(154)
§ 10.1	轴向自由振动	(154)
§ 10.2	伯努利-欧拉梁横向自由振动	(156)
§ 10.3	连续系统固有频率瑞利近似表示法	(161)
§ 10.4	具有剪切变形与转动惯量梁自由振动	(163)
§ 10.5	固有模态特性	(164)
§ 10.6	薄板振动	(167)

III 多自由度系统

第 11 章	MDOF 系统数学模型	(177)
§ 11.1	集总参数模型牛顿定律应用	(177)
§ 11.2	拉格朗日方程	(182)
§ 11.3	集总参数模型拉格朗日方程应用	(185)
§ 11.4	连续系统拉格朗日方程应用——假定振型法	(189)
§ 11.5	约束坐标与拉格朗日乘子	(196)
第 12 章	无阻尼 2-DOF 系统自由振动	(206)
§ 12.1	2-DOF 系统自由振动	(206)
§ 12.2	模态与频率的例题	(210)
§ 12.3	刚体模态系统	(214)
§ 12.4	无阻尼 2-DOF 系统简谐激励响应——振型叠加	(216)
第 13 章	MDOF 系统自由振动	(224)
§ 13.1	固有频率与固有模态特性	(224)
§ 13.2	瑞利法、瑞利-里兹法	(237)
第 14 章	MDOF 系统模态与频率数值计算	(243)
§ 14.1	介绍解代数特征问题方法	(243)
§ 14.2	向量迭代法	(244)
§ 14.3	应用 'ISMIS' 程序解 MDOF 系统模态与频率	(250)
第 15 章	MDOF 系统动力响应——振型叠加法	(259)
§ 15.1	主坐标	(259)
§ 15.2	振型位移解无阻尼 MDOF 系统响应	(261)
§ 15.3	振型加速度解无阻尼 MDOF 系统响应	(265)
§ 15.4	振型叠加解粘滞阻尼系统响应	(267)
§ 15.5	振型叠加解动应力	(275)
§ 15.6	刚体模态无阻尼系统的振型叠加	(278)
第 16 章	结构有限元模拟	(287)
§ 16.1	有限元法概述	(287)
§ 16.2	单元刚度矩阵、质量矩阵与力向量	(288)
§ 16.3	单元矩阵变换	(296)
§ 16.4	系统矩阵装配——直接刚度法	(300)
§ 16.5	边界条件	(306)

§ 16.6	约束——缩减自由度	(308)
§ 16.7	刚体模态系统	(311)
第 17 章	振动分析有限元模型	(320)
§ 17.1	有限元解固有频率与模态	(320)
§ 17.2	振型位移法确定动力响应的有限元解	(328)
第 18 章	动力响应直接积分法	(341)
§ 18.1	MDOF 系统的阻尼	(341)
§ 18.2	非线性 MDOF 系统	(344)
§ 18.3	逐步数值积分算法特性	(346)
第 19 章	分量模态综合	(354)
§ 19.1	分量模态综合概述	(354)
§ 19.2	约束部件的分量模态	(355)
§ 19.3	无阻尼自由振动系统综合	(356)
§ 19.4	无约束部件的分量模态	(361)
§ 19.5	剩余柔度; 剩余分量模态	(365)
第 20 章	结构地震响应概述	(376)
§ 20.1	引言	(376)
§ 20.2	SDOF 系统地震激励响应——反应谱	(378)
§ 20.3	MDOF 系统地震激励响应	(384)
§ 20.4	进一步研究	(387)
附录 A	单位制	(390)

I 单自由度系统

第 1 章 结构动力学的科学与技巧

作为引言的这一章,本书一开始就着重讨论数学公式与数学原理,这样可能有助于读者来敲开结构动力学这个具有魅力科目的大门。作为一名结构动力技术人员,必须精通数学模拟这门“技巧”,并在众多的情况下,结构动力技术人员还必须掌握结构动力的试验方法。为了能够得到有用的成果,要求能锻炼出熟练的技巧与判断能力。

本章将完成如下内容:

- 在结构分析中,指出何时需要考虑动力问题。
- 动力问题研究的三个阶段。
- 论动力分析中结构的数学模型。
- 论结构动力试验。

§ 1.1 结构动力学引言

制造一辆地面交通运输工具,并沿其轨道高速行驶;或在海洋区域建立一座近海钻井平台;或一架喷气式飞机正飞越雷暴区等等。它们的共同问题是什么呢?答案只有一个,那就是所有都属于结构,而所有的结构又都要承受动力荷载。这样就将结构的安全、结构的性能和结构的可靠性问题放在一个突出的位置上。这类问题就带来了需要做大量的分析和试验工作,以确定它们的动力荷载响应。

从上面的问题来看,动力学意味着是时间的变化。动力荷载就是一个随时间而变化的幅值、方向和作用点。由此而得到与时俱变的挠度和应力,这就构成了动力响应。如果荷载已知为时间的函数,该荷载就叫作**确定性的**。一个指定的结构系统对一个确定性的荷载就叫做**确定性分析**。如果荷载的时间历程并不十分完全清楚,而只知道其统计含义时,那么荷载就叫作**随机的**。本书仅论述确定性荷载。

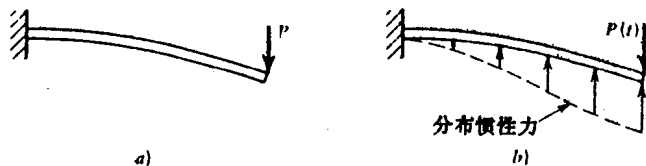


图 1.1 一悬臂梁承受
a) 静力荷载; b) 动力荷载

结构动力问题在两个重大的方面不同于相应的静力问题。首先上面一开始就指出了,即激励的与时俱变性质。那么重要的是加速度在结构的动力问题中起了主要作用。图 1.1a 表示了一根在静荷载作用下的悬臂梁,它的挠度与内应力直接取决于荷载 P 。其次,图 1.1b 表示的是一根相似的悬臂梁,承受了一个与时俱变的荷载 $P(t)$ 。则梁的加速度引起一个分布的惯性力。如果惯性力对结构的挠度和内应力有显著影响时,就需要研究它的动力问题了。

图 1.2 是一幅动力研究的典型步骤图。它分为三个主要的阶段:设计阶段、分析阶段和试验阶段。动力研究常常是需要其中的一个或两个方面。例如,土木工程师可以要求完成一座现有大坝的动力分析工作,并以大坝的动力试验来验证所做的分析^[1,11]。分析与试验的成果可以订出一个最大水深标准,使大坝能够抵抗规定的地震激励所造成的破坏,以确保大坝的安全。又如汽车工程师要做许多分析和试验工作,来确定新设计汽车的动力特性。^[1,22]这样的分析与试验成果常常要导致设计的改变,以便改进车辆的行驶性能和降低车辆的成本。

本书主要是论述动力研究中的分析阶段,然而,为了强调理论与实践的紧密结合,也要讨论结构的动力试验方法。同时,在本书后面要叙述应用计算机程序或其他结构的动力计算机程序,以研究重要的设计参数。

§ 1.2 结构动力特性分析

在任何动力分析阶段,最大的愿望多半是构思一个结构的数学模型。以图 1.2 中 2a 和 2b 的步骤来说明这个过程。在 2a 步骤中,读者必须设计一个结构系统的理想模型来进行研究,使之与实际的系统基本一样(不管是已有的系统,还是正在计划中的系统);并使之数学分析比较容易。这样的**解析模型**应包括:(1)一组简化的假定,使之简化的真实系统成为解析模型。(2)一组描述解析模型的简图。(3)设计参数一览表(尺寸、材料等)。

解析模型可分为两种基本类型:**连续模型**与**离散参数模型**。图 1.3a 所表示的是一悬臂梁的连续模型。为了表示出全部有效惯性力的效应,所以必须考虑位移参量的数目,这称之为系统的**自由度(DOF)数目**。因此一个连续系统的模型就表示了一无限个自由度的系统。另外图 1.3b 与图 1.3c 表示的是一有限个自由度的系统。这里所表示的离散参数模型叫作**集中质量模型**,因为系统的质量假定是用很少数目点的质量或质点来表示的。在第 2 章和第 11 章中将进一步讨论构成离散参数模型的集中质量法和一些其他的方法。

要构成一个有用的解析模型,读者必须认真地考虑你所计划中解析模型的应用,也就是说,假定的模型应正确地表达其真实系统的特性。它必须表示出系统的典型特性以确定解析模型的复杂程度。例如图 1.4 表示了应用在阿波罗土星 V 型(Apollo Saturn)宇宙火箭动力特性研究中的四种不同的解析模型。这个 30-DOF 梁-杆模型是用来进行初步研究的,并且用来确定所需要的足尺试验。另外在图 1.4 示出的 300-DOF 模型,是需要给出在飞行时传感器位置运动的精确描述。只要模型足够地表示了所需要的性能,则解析模型愈简单愈好。

一旦读者建立了结构的解析模型并希望去研究,那么应用物理定律[即牛顿(Newton)定律,应力-应变关系等]来取得用数学语言描述解析模型的运动微分方程组。连续模型导致了偏微分方程组,而离散参数模型则引出常微分方程组。如此推导出的运动微分方程组就称为结构的**数学模型**。想得到数学模型,读者要应用动力学[即牛顿定律,拉格朗日(Lagrange)方程]和变形体力学的研究方法(即应力-应变关系,应变-位移关系),并将这些组合起来,即可得到描述变形结构动力特性的微分方程组。

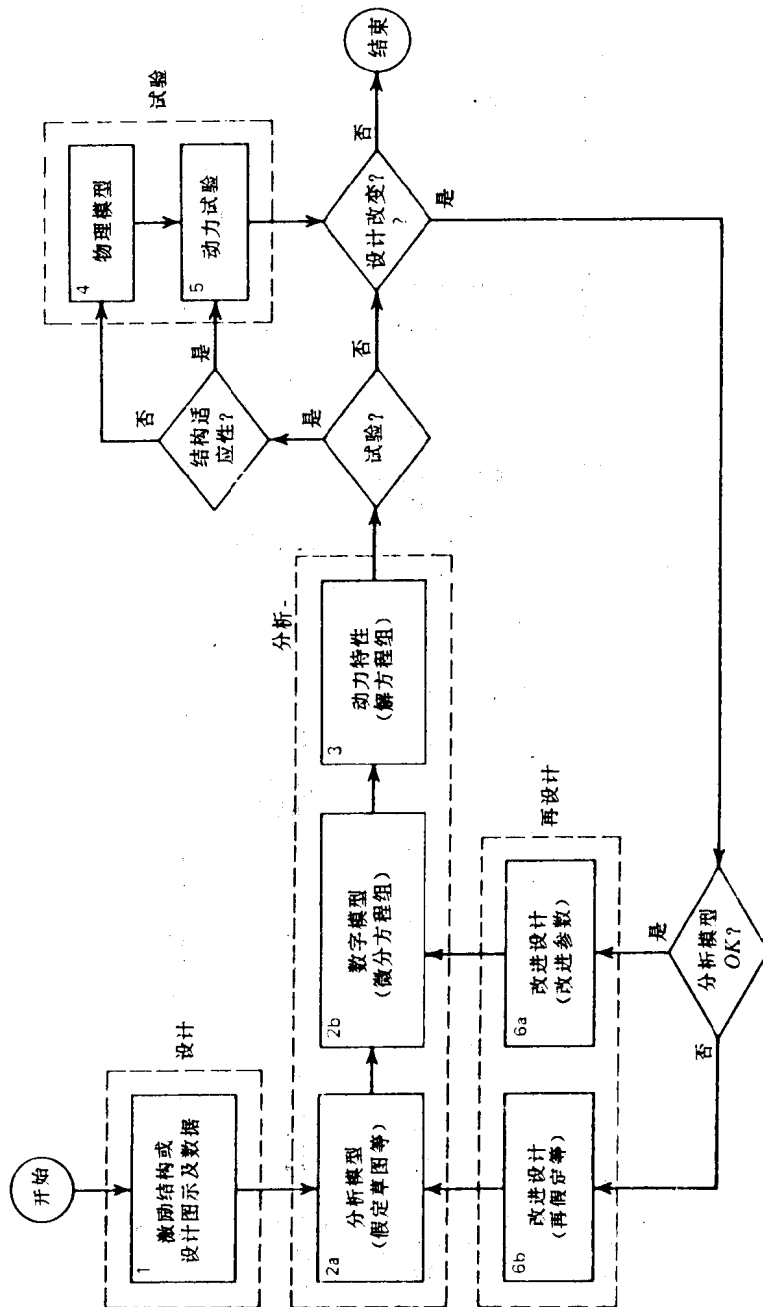


图 1.2 动力研究的步骤

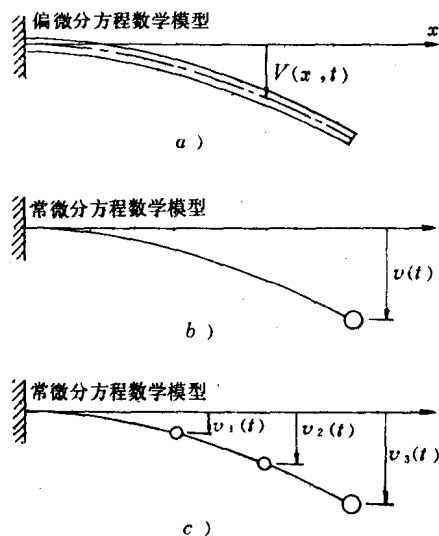


图 1.3 悬臂梁的连续和离散参数解析模型

- a) 分布质量悬臂梁——连续模型；
- b) 一个自由度模型——离散参数模型；
- c) 三个自由度模型——精确的离散参数模型；

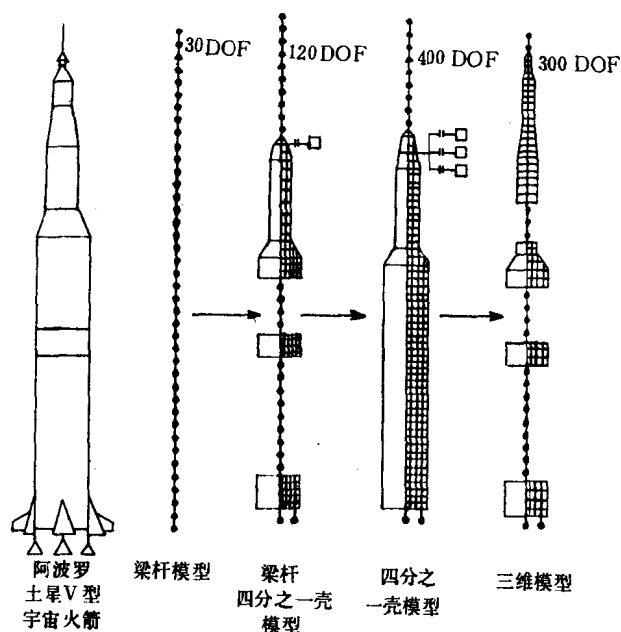


图 1.4 阿波罗土星 V 宇宙火箭动力研究时所使用的不同复杂程度的解析模型

实际上,读者会发现,首先构成一个解析模型,而后构成一个数学模型的整个过程,可简称为**数学模拟**。在使用大型计算机程序,例如 **NASTRAN**^[1.3] 或 **SAP**^[1.4] 进行动力分析时,读者的主要模拟工作是简化该系统,并提供其尺寸、材料特性、荷载等等的输入数据。这正是结构动力

技巧发挥其作用的地方。另一方面实际上形成微分方程与解微分方程皆由计算机来完成。图 1.5 表示为一辆大型轿车车体的照片和由计算机所形成的结构概化图,即解析模型,是输入到计算机中的。计算机绘图用在形成结构数学模型时,已变成无法估价的有用工具了。

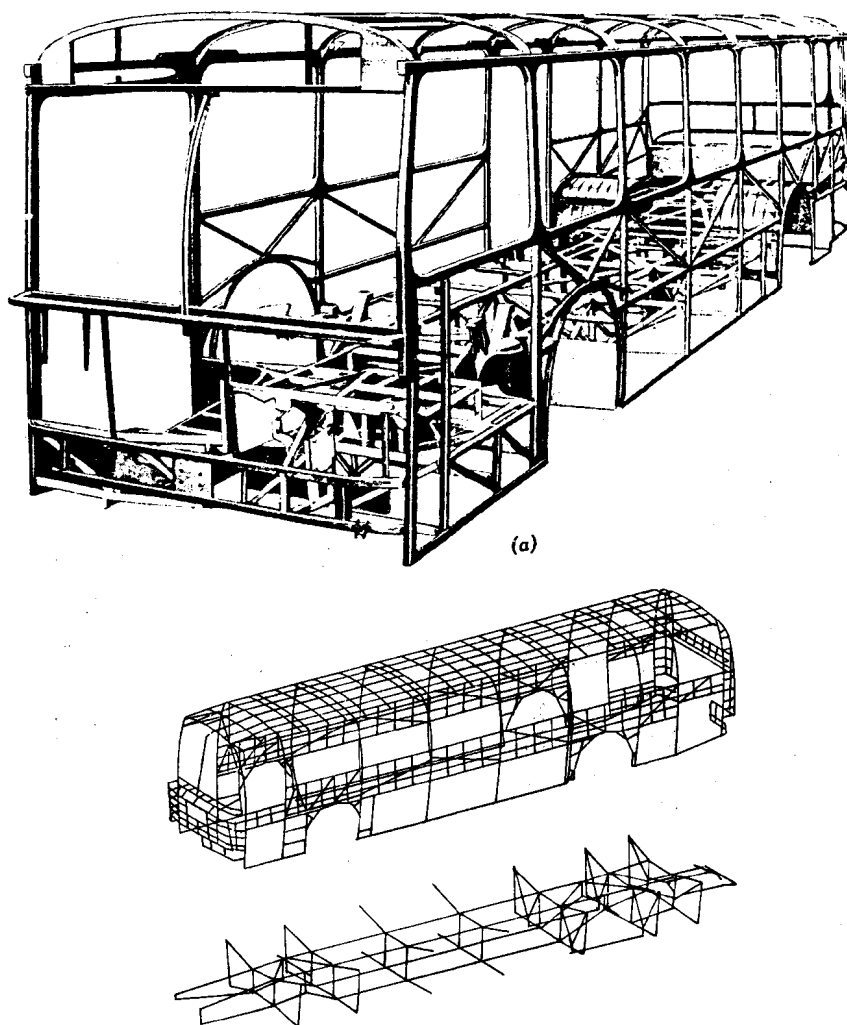


图 1.5 a)大型轿车车体结构;b)大型轿车车体(结构)的有限元模型

待列出了数学模型公式以后,下一步的动力分析工作是解这个微分方程组,以求得动力响应。在结构应用中,有两种主要类型的动力特性,一种是**自由振动**,另一种是**强迫响应**。前者是由规定的初始条件而得到的运动,后者是由外激励源规定为系统的输入而得到的运动。读者去解系统受到所规定的初始条件以及外激励源输入的运动微分方程组,以得到该结构运动时所形成的时间历程。这样就形成了实际结构所预示的动力特性,即**响应**。

动力研究的**分析阶段**是由以上所述的三个步骤所组成:确定**分析模型**,推导**数学模型**和**解动力响应**。在所规定的动力研究中,这三个步骤常常都是需要的。本书主要是论述动力研究中分析阶段的第二步与第三步。

§ 1.3 结构动力试验

动力试验的基本目的是来证实数学模型。在多数情况下,用来求得有关荷载以及在动力分析中所需要的其他重要参量。在某些情况下,可以进行一些小比尺的物理模型试验,例如飞机模型的风洞试验。另外有的时候,如果做些原型结构试验是可行的话,就进行这些试验。

一个新结构正在设计中时(海洋平台、飞机等),在设计方案初常常需用试验的方法来核定其数学模型,同时也要得到结构在使用期间遭遇到可能荷载的有效数据。为了这个目的,要构成一个物理模型。图 1.6 展示了一枚宇宙航天飞行运载火箭^[1.5]的四分之一模型的地面振动

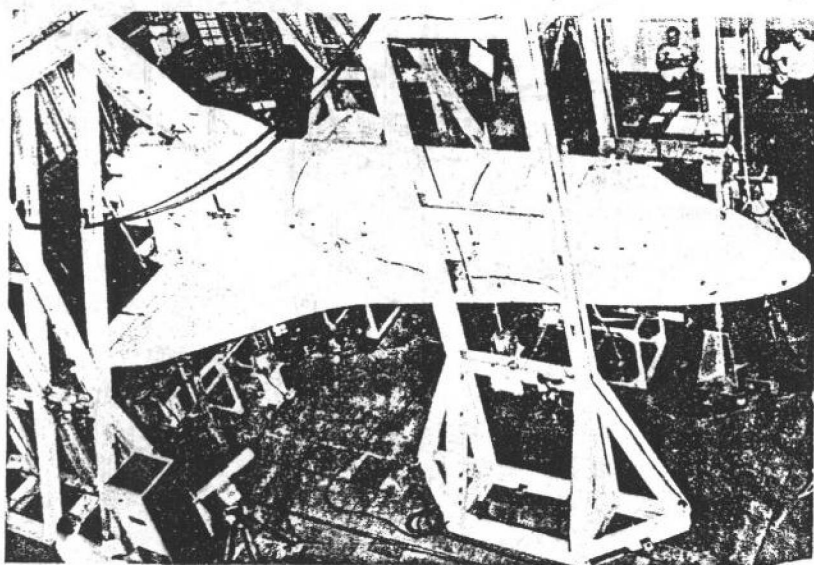


图 1.6 宇宙航天飞机运载火箭四分之一模型的地面振动试验

试验的一张照片。缩小比尺的模型试验,大多数做成十分之一的模型或更小一些。

俟该实际结构成为可采纳时则应做进一步的实验,例如航天火箭在实际飞行前,必须在地面接受广泛深入的静动力试验。图 1.7 为一张波音(Boeing) YC-14 型飞机在进行一次地面振动试验的照片。注意图片中在机翼端的下部与水平机尾下部置有电振动器。

还可以应用物理模型的动力试验对结构动力性能,特性的等级进行定性与定量分析。例如图 1.8 为一张圆柱形容器,槽内装有液体的结构在振动台上的照片。^[1.8]

§ 1.4 本书范围

本书开始的大部分章节,包括第 2 章至第 8 章是论述单自由度 SDOF 系统的。第 2 章所叙述的是拟定 SDOF 系统数学模型的方法,牛顿定律和虚位移原理的应用。第 3 章的内容是无阻尼系统与粘滞阻尼系统的自由振动。整个第 4 章读者会学到简谐(正弦曲线型)激励的 SDOF 系统响应。这大概是全书中最重要的内容,因为它们描述了动力响应的基本特性。第 5、6 和 7 章中连续地讨论了 SDOF 系统的动力响应。第 5 章论述了特殊输入时间历程的 SDOF 系统响