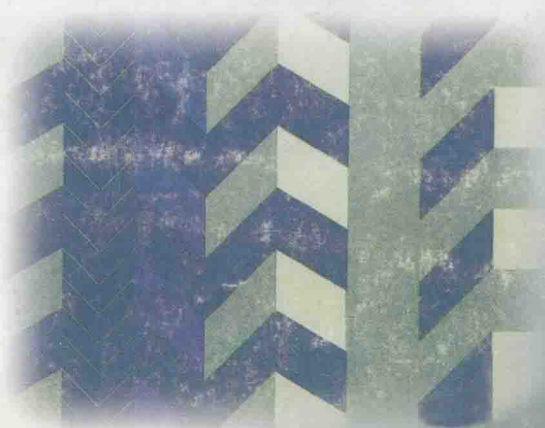


JISUAN JIEGOU DONGLIXUE

计算结构动力学

秦 荣 著 韦树英 审



广西师范大学出版社

计算结构动力学

秦 荣 著
韦树英 审

广西师范大学出版社

计算结构动力学

秦 荣 著

韦树英 审

责任编辑:东 方 张晓云

封面设计:子 拙

广西师范大学出版社出版发行

邮政编码:541001

(广西桂林市中华路 36 号)

广西农业大学印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:14.25 字数:357 千字

1997 年 4 月第一版

1997 年 4 月第一次印刷

印数:0001—1000 册

ISBN 7-5633-2178-O/TU · 001

定价:20.00 元

内容简介

本书阐述结构动力分析的新理论新方法,共十四章,内容包括瞬时变分原理,建立结构动力方程的样条函数方法,结构动力特性算法,结构动力方程新解法及高层建筑结构、板壳、旋转薄壳、厚壁结构、桥梁结构、水工结构、地下结构、耦合体系及结构非线性动力问题分析的新理论新方法,还有结构模糊随机动力问题。本书内容丰富、新颖、有创造性,书中既有理论,又有实际应用,附有例题。

本书可作为固体力学、结构力学、计算力学、工程力学、土木、水利、桥梁、航空、船舶、化工、采矿、地下结构、国防工程及机械工程等有关专业的研究生和大学本科生的教材或教学参考书,也可供上述各领域的教学、科研人员及工程技术人员参考。

前 言

在现代化建设中,有许多结构动力问题,结构动力学已成为现代化建设不可缺少的一门重要学科,我们应该充分发挥它的巨大作用,为振兴中华做出应有的贡献。

结构动力问题是一个复杂问题。有限元法虽然是解决工程问题的一个有力工具,但在实践中,也逐步暴露了一些自身难以克服的一些缺点,最突出的是所解问题的复杂性与经费及计算机能力有限之间的矛盾很大,对于复杂的结构动力问题,用有限元法解题所需单元、内存及计算工作量十分惊人。由于经费及计算机条件所限,往往造成在工程应用上难以实现的状态。显然需要另外开创一些经济有效的新方法。随有限元法之后,又出现一些新的方法,例如,有限条法,边界元法,现代加权残数法,样条函数方法、半解析半离散法及耦合法,为解决工程中的问题开拓了新途径。

1978年以来,作者致力于研究工程科学及力学中的样条函数方法、半解析半离散法及耦合法,开拓了一个新的研究领域,提出了一些新理论新方法,开拓与发展了结构分析的新学科,为结构分析开拓了一个新的途径。

本书是在这个基础上写成的,取材主要是作者自己的研究成果。这些成果大多数在国内外已公开发表,被引用很多,影响很好,有些论文被世界著名的美国《工程索引》收录,有些还获得省级以上的科技进步奖。总之,本书是作者十几年来科研成果(一部分)的科学总结。

本书共十四章。第一章主要介绍一些与结构动力学有关的基本概念,作为掌握本书所述方法的一些基础。

第二章主要介绍瞬时变分原理,作为研究结构动力学的理论

基础。

第三章主要介绍建立结构动力方程的新方法,重点介绍样条有限点法及 QR 法。样条有限点法及 QR 法比有限条法优越。QR 法集有限元法、有限条法及样条函数方法的优点于一身,成功地克服了有限元法及有限条法的缺点。这两种方法都是经济有效的分析方法,比有限元法及有限条法都优越。

第四章主要介绍结构动力学特性的算法,重点介绍直接滤波法,能量迭代法及子空间迭代法,附有计算例题。

第五章主要介绍结构动力方程的解法,重点介绍一些用样条加权残数法建立起来的新方法。这些方法比目前国内外流行的 Wilson- θ 法及 Newmark 法都优越,附有算例比较。

第六章主要介绍高层建筑结构动力问题,重点介绍 QR 法及样条子域法建立结构动力方程。样条子域法集有限元法、有限条法、样条函数方法、QR 法、边界元法及加权残数法的优点于一身,成功地克服了它们的缺点,是一种经济有效的方法。对于开洞结构,采用 QR 法或样条子域法分析特别方便。附有算例。

第七章主要介绍薄板薄壳动力分析的新方法,重点介绍样条有限点法及 QR 法,这种方法分析板壳比有限元法及有限条法优越得很多。对于开洞板壳,采用 QR 法分析特别简便。附有算例。

第八章主要介绍旋转薄壳动力问题,重点介绍样条有限点法及 QR 法。这两种方法分析旋转薄壳特别经济有效。附有算例。

第九章主要介绍厚壁结构动力问题,重点介绍厚板厚壳理论及新方法。

第十章主要介绍桥梁结构动力问题,重点介绍箱型结构动力分析的新方法。

第十一章主要介绍水工结构动力问题,重点介绍薄拱坝及厚拱坝分析的新方法,附有算例。

第十二章主要介绍耦合体系动力问题,重点介绍结构与介质

相互作用理论及其应用。这种体系采用耦合法分析最有利。本章采用样条边界元—能量配点法分析流固问题,采用样条子域法—QR法分析高层建筑结构与地基相互作用,采用样条半解析边界元—能量配点法分析地下结构与周围介质相互作用,并介绍特解边界元法及对称边界元法。附有算例。

第十三章主要介绍结构非线性动力问题,重点介绍分析结构非线性动力问题的新方法。附有算例。

第十四章主要介绍模糊随机动力问题,重点介绍有关变分原理及分析方法。

本书主要阐述计算结构动力学,但这些理论及方法对静力分析、稳定分析、几何非线性、材料非线性、结构与介质相互作用都适用。本书内容不仅可用于建筑结构、桥梁结构、水工结构、地下结构、岩土工程、海洋工程,而且对机械、化工、国防、电气、造船、航空、矿山工程也适用。因此,本书适用范围很广,适应性及通用性很强。

1978年以来,作者研究过许多项目。这些项目分别获得国家自然科学基金委员会、广西科委、广西教委及广西大学资助,本书包含这些资助项目的许多研究成果,现借此机会表示衷心的感谢。

在本书的写作出版过程中,得到国内许多老前辈和同志们们的热情关怀和大力支持,得到广西大学出版社筹备处及广西师范大学出版社的热情帮助及大力支持,许多同志为此操劳,我的许多研究生用这些方法算过许多例题,特此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,时间仓促,错误和缺点在所难免,请帮助指正。

秦 荣

1995年5月于广西大学

目 录

前 言

第一章 基本概念	(1)
1.1 结构动力荷载	(1)
1.2 体系自由度	(2)
1.3 结构动力方程	(3)
1.4 结构动力特性	(4)
1.5 结构动力响应	(10)
参考文献	(23)
第二章 瞬时变分原理	(24)
2.1 弹性动力问题	(24)
2.2 瞬时虚功原理	(25)
2.3 瞬时最小势能原理	(27)
2.4 哈密顿原理	(30)
2.5 瞬时势能原理	(32)
2.6 瞬时广义变分原理	(33)
2.7 张量	(36)
参考文献	(41)
第三章 建立结构动力方程的样条函数方法	(42)
3.1 样条函数	42)
3.2 基函数	(58)
3.3 样条有限点法	(62)
3.4 QR 法	(67)
3.5 梁的振型函	(73)

参考文献	(74)
第四章 结构动力特性的算法	(75)
4.1 特征值问题	(75)
4.2 直接滤频法	(78)
4.3 能量迭代法	(82)
4.4 子空间迭代法	(92)
参考文献	(100)
第五章 结构动力方程的解法	(102)
5.1 基本方程	(102)
5.2 样条振型叠加法	(104)
5.3 样条直接积分法	(106)
5.4 样条子时域法	(109)
5.5 初参数法	(110)
5.6 向量追赶法	(112)
5.7 递推算法	(113)
5.8 算法稳定性	(117)
5.9 算法精度	(122)
5.10 超越现象	(129)
5.11 5 次样条加权残数法	(130)
5.12 计算例题	(135)
参考文献	(138)
第六章 高层建筑结构动力问题	(139)
6.1 框架动力分析的 QR 法	(139)
6.2 剪力墙动力分析的 QR 法	(146)
6.3 框剪结构动力分析的 QR 法	(153)

6.4	联剪结构动力分析的 QR 法	(155)
6.5	筒体结构分析的 QR 法	(157)
6.6	高层建筑空间结构分析的样条子域法	(163)
6.7	计算例题	(168)
6.8	附录(重要资料)	(171)
	参考文献	(182)
第七章	板壳动力问题	(183)
7.1	板壳瞬时变分原理	(183)
7.2	板壳动力分析的样条有限点法	(188)
7.3	薄板动力分析的 QR 法	(197)
7.4	扁壳动力分析的 QR 法	(205)
7.5	园柱薄壳动力分析方法	(213)
7.6	计算例题	(217)
	参考文献	(222)
第八章	旋转薄壳动力问题	(223)
8.1	基本方程	(223)
8.2	旋转薄壳动力分析的样条有限点法	(227)
8.3	旋转薄壳动力分析的 QR 法	(234)
8.4	截锥单元	(238)
8.5	计算例题	(246)
	参考文献	(253)
第九章	厚壁结构动力问题	(254)
9.1	深梁动力分析方法	(254)
9.2	厚板厚壳理论	(264)
9.3	厚板动力分析方法	(272)

9.4	厚扁壳动力分析方法	(277)
9.5	轴对称厚壳动力分析方法	(283)
9.6	截锥厚壳单元	(288)
	参考文献	(293)
第十章	桥梁结构动力问题	(294)
10.1	厚拱动力分析方法	(294)
10.2	箱型结构理论	(298)
10.3	样条子域法	(301)
10.4	QR 法	(314)
10.5	直箱型结构动力问题	(317)
10.6	曲箱型结构动力问题	(319)
10.7	箱型子域	(319)
	参考文献	(320)
第十一章	水工结构动力问题	(322)
11.1	薄拱坝的样条子域法	(322)
11.2	拱坝分析的样条子域法	(329)
11.3	拱坝分析的 QR 法	(341)
	参考文献	(342)
第十二章	耦合体系动力问题	(344)
12.1	新的动态样条边界元法	(344)
12.2	坝与水相互作用	(350)
12.3	水—拱坝—地基耦合体系	(363)
12.4	高层建筑结构—基础—地基耦合体系	(372)
12.5	样条半解析边界元法	(374)
12.6	动态样条半解析边界元法	(378)

12.7	地下结构与周围介质耦合体系	(380)
	参考文献	(381)
第十三章	结构非线性动力问题	(383)
13.1	非线性动力方程	(383)
13.2	非线性动力响应的解法	(384)
13.3	几何非线性动力问题	(394)
13.4	材料非线性动力问题	(397)
13.5	混合非线性动力问题	(402)
13.6	计算例题	(403)
	参考文献	(406)
第十四章	结构模糊随机动力问题	(407)
14.1	基本概念	(407)
14.2	随机变分原理	(408)
14.3	随机样条函数方法	(411)
14.4	随机 QR 法	(416)
14.5	模糊变分原理	(421)
14.6	结构模糊分析方法	(424)
14.7	模糊随机变分原理	(433)
14.8	模糊随机分析方法	(434)
14.9	模糊随机振动	(435)
	参考文献	(436)
	编后语	(437)

第一章 基本概念

在结构动力学中,一般包括下列四个问题:(1) 研究动力荷载(干扰力)的变化规律;(2) 建立结构动力方程;(3) 求结构动力特性;(4) 求结构动力响应。本章主要介绍一些与上述四个问题有关的基本概念。

1.1 动力荷载

作用在结构上的荷载,可以分为静力荷载及动力荷载。动力荷载的大小、方向和位置随时间变化很快,因而使结构产生振动。在振动过程中,由于结构各质点产生加速度,因此各质点的质量便产生相应的惯性力。静力荷载的大小、方向和位置不随时间变化,不产生加速度及惯性力。如果结构上的荷载,虽然随时间变化,但结构各质点的加速度很小,所产生的惯性力可以忽略不计,则这种荷载可以当作静力荷载。在结构分析中,通常遇到下列几种动力荷载。

1.1.1 简谐荷载 这种荷载随时间变化的规律可用正弦函数或余弦函数表示。机器转动部分引起的荷载常属于这类荷载。例如,安置在结构上的电动机对结构会产生简谐荷载。这种荷载作用于结构时,在一定条件下可产生共振。由于共振,不大的简谐荷载会引起很大的动力位移及动力内力。

1.1.2 冲击荷载 这类荷载的特点是在很短时间内荷载值急剧增大或急剧减小。例如,锻锤对基础的碰撞及爆炸引起的冲击都属于冲击荷载。这种荷载对结构孤立的少数几次冲击不致引起共振。

1.1.3 地震荷载 地震时,由于地面激烈运动对结构产生的干扰力即为地震荷载。这类荷载随时间变化的规律很复杂,这是一种随机模糊荷载。

1.1.4 脉动风压 当风力很强时,结构某处的风压可以分解为稳定风压和脉动风压。稳定风压对一般结构的作用可视为静力荷载,而脉动风压对高耸柔性结构(例如烟囱,水塔及电视塔)产生相当大的振动,应视为一类动力荷载。脉动风压随时间变化的规律很复杂,也是一种随机模糊荷载。

1.2 体系的自由度

在动力问题中,需要考虑质量的惯性力,因此对结构进行动力分析时,必须确定结构质量的分布情况及其在振动中的位置。结构在振动过程中,质量在任一瞬时的几何位置可以用独立的几何参数来确定,其参数的数目称为体系的振动自由度,简称体系的自由度。例如,图 1.1 所示的梁,有三个质点,如果不计梁本身的质量、梁的轴向变形及质点的转动惯性,则这三个质点在梁的振动过程中只有竖向位移,它们的几何位置只需三个几何参数 u_1, u_2, u_3 就可完全确定,因此这个体系只有 3 个自由度,称为 3 个自由度体系。

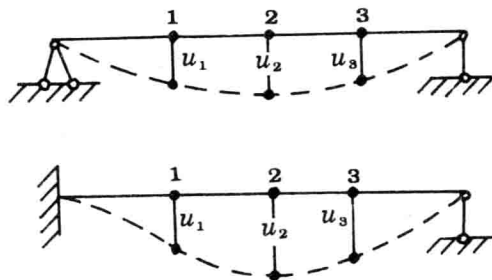


图 1.1 三个自由度体系

图 1.2 所示的体系,只有一个集中质量 A ,体系在振动过程中,质量 A 处有三个位移分量:杆的轴向位移 u ,竖向位移 v 及转角 θ ,质量 A 在任一瞬时的几何位置可由 u, v 及 θ 确定,如果不计杆本身的质量,则图 1.2 所示的体系有 3 个自由度,称为 3 个自由

度体系。如果不计杆本身的质量、杆的轴向变形及质量 A 的转动惯性,则图 1.2 所示的体系可变为图 1.3 所示的体系,这个体系只有一个自由度,称为单自由度体系。

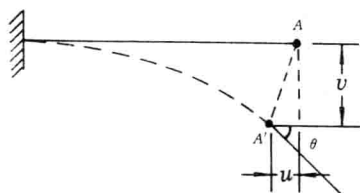


图 1.2 三个自由度体系



图 1.3 一个自由度体系

1.3 结构动力方程

如果结构为 n 个自由度的体系(图 1.4),则它的动力分析可归结为在一定条件下求解下列常微分方程组:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = P \quad (1.1)$$

这个微分方程组就是结构动力方程。式中 M 、 C 及 K 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵,都是 n 阶矩阵; U 、 $\dot{U}$ 、 $\ddot{U}$ 及 P 分别为 n 维的位移向量、速度向量、加速度向量及干扰力向量,它们都是时间 t 的函数,即 $U = U(t)$, $P = P(t)$ 。

在线性问题中,质量矩阵 M 、阻尼矩阵 C 及刚度矩阵 K 的元素都是常数。如果结构处于自由振动状态,则干扰力向量为零,即 $P = 0$ 。也就是说,体系在无外来干扰力作用时所发生的振动称为自由振动。

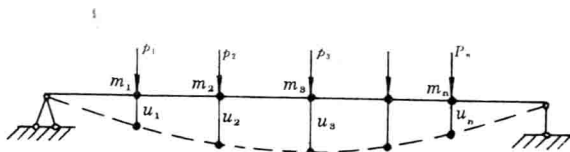


图 1.4 n 个自由度体系

在工程设计中,结构动力分析常采用集中质量法把分布质量集中到单元的结点上(图 1.4)。由这种模型得到的质量矩阵称为集中质量矩阵,它是一个对角线矩阵:

$$M = \text{diag}(m_1, m_2, \dots, m_n) \quad (1.2)$$

式中 m_i 代表结点 i 的集中质量。

阻尼对振动的影响,一般比惯性及刚度的影响小,因此用近似法来确定阻尼矩阵 C 是合理的。一般采有下列关系:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1.3)$$

式中

$$\alpha = \frac{2(\omega_j \xi_i - \omega_i \xi_j)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \omega_i \omega_j \quad \beta = \frac{2(\omega_j \xi_j - \omega_i \xi_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \quad (1.4)$$

式中 ω_i 及 ω_j 分别为第 i 振型及第 j 振型的自振频率; ξ_i 及 ξ_j 分别为相应的阻尼比,可通过实验结果或实测资料来确定。

1.4 结构动力特性

结构动力特性包括结构的自振频率、振型及阻尼,它们都是结构动力学的重要特性。

1.4.1 自振频率及振型

如果弹性体系处于无阻尼的自由振动状态,则式(1.1)可变为下列形式:

$$M\ddot{U} + KU = \{0\} \quad (1.5)$$

式中 $U = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n]^T$

如果结构作简谐振动,则式(1.5)的特解可采用下列形式:

$$U = U^* \sin(\omega t + \alpha) \quad (1.6)$$

式中 ω 为结构自由振的圆频率,简称结构的自振频率; U^* 为 U 的振幅向量,与时间 t 无关。将式(1.6)代入式(1.5)可得:

$$(K - \omega^2 M)U^* = \{0\} \quad (1.7)$$

式中 $U^* = [u_1^* \ u_2^* \ \dots \ u_n^*]^T$

因为结构处于自由振动状态,因此 $U^* \neq 0$ 。由式(1.7)可知,

U^* 的系数行列式必须为零:

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (1.8)$$

这个方程称为频率方程。由此可求出 n 个自由度体系的 n 个自振频率 $\omega_k, k = 1, 2, \dots, n$ 。

当自振频率确定后,对于每一个自振频率 ω_k ,利用式(1.7)可以确定一个相应的 U_k^* 。由式(1.6)可知,对于每一个 ω_k ,都有一个特解:

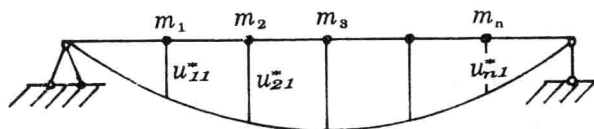
$$U_k = U_k^* \sin(\omega_k t + \alpha_k) \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (1.9)$$

式中 U_k^* 为对应于 ω_k 的振幅向量, U_k 为对应于 ω_k 的位移向量。由式(1.9)可知:

(1) 体系在振动过程中,各质点都按同一自振频率 ω_k 作同步简谐振动。

(2) 体系在振动过程中,对于同一自振频率 ω_k ,各个质点位移之间的比值保持不变。由此可知,在振动过程中,对于同一自振频率 ω_k ,体系的变形形态保持不变。这种与自振频率 ω_k 相应的振动形态称为振型或模态(图 1.5)。

由上述可知,振型只决定于各质点位移的比值,也就是说,振型只决定于各质点位移振幅向量的相对值,与各质点位移振幅的大小无关。每一个自振频率都相应于一个振型,对应于第 k 个自振频率 ω_k 的振型叫做第 k 个振型。



(a) 第 1 振型