

我国随机振动研究近 10 年来的进展*

张森文

庄表中

(中国农业大学东校区) (浙江大学力学系)

欧阳怡

郑万泔

(中国科学院力学所) (南京汽轮机厂)

摘 要 本文回顾了我国随机振动专业委员会成立后的 10 年间我国学者在随机振动领域所进行的理论、应用技术研究方面取得的一些重要进展,着重介绍了随机非线性响应时域积分方法与空间有限元结合的随机动力有限元方法的发展;对随机振动与其它相关学科的交叉渗透进一步发展的前景也作了展望。

关键词: 振动工程, 随机振动, 进展

中图分类号: O324

0 引 言

随机振动是一门用概率与统计方法研究受随机载荷的机械与结构系统的稳定性、响应、识别及可靠性的技术学科。经过 30 多年各国学者的共同努力,理论分析、计算方法、实验及测试技术、工程设计优化方法等诸多领域得到了迅速发展,已成为现代应用力学的一个重要分枝。

由于历史的原因,我国学者在此领域的工作从 70 年代中后期才开始发展。初期主要是翻译出版国外的有关专著^[1~5],在 80 年代教学、研究的基础上出版了一系列的专著和教材^[5~16],近 10 年间得到了迅速的发展,在理论和工程实际应用中都取得了可喜的成就。早在 1986 年,由从事随机振动领域研究的学者在镇江召开首次全国性的随机振动学术交流会上成立了随机振动学会。随后 1987 年中国振动工程学会成立,随机振动学会成为该学会的二级专业委员会。1988 年 2 月在郑州召开了第二届学术交流会,1991 年 8 月在山东泰安召开了第二届理事会暨学术交流会,分别出版了论文专集,收录了近 100 篇论文,1995 年召开了常务理事会并部署进行了第三届理事会的推选工作。专业委员会在推动我国学者对此一领域的学术交流、科学研究和人材培养等方面作出了自己的贡献。本文着重分析自 1989 年以来我国在随机振动及其相关领域所取得的研究成果,并对将来的发展作一初步的展望。

1 近 10 年的研究进展

随机振动理论是机械振动或结构动力学与概率论相结合的产物,而作为一种技术学科乃是应工程实践需要而产生并为工程实践服务的。近 10 年来,在理论基础、分析方法、数值计算、信号分析测试技术和实验研究、载荷分析、环境减振降噪、设计优化、故障诊断、工程可靠性分析等诸多方面,得到了全方位的发展,结构工程、地震工程、海洋工程、车辆工程、包装工程、机械工程、飞行器、土木

* 本文受国家自然科学基金资助。
收稿日期:1997-03-18 修改稿收稿日期:1997-05-23

工程等方面有了广泛的应用,并与其它相关学科如非线性振动、有限元方法等相结构交叉而产生新的生长点,如非线性随机振动,随机分叉与随机浑沌,随机有限元等方面并取得长足进展,跟上了国际的发展潮流,有些研究达到了国际先进水平,在国际学术交流中发挥了影响。

在理论基础和分析方法的研究方面,王光远、季文美、朱位秋、欧阳怡、庄表中、郑兆昌、方同、甘幼琛、张景绘、陈塑寰等学者分别在他们的有关专著和重要论文中作出了重要的贡献,有些专著得到国外知名学者的高度评价^[5~17,101]。

根据不完整的统计,仅从国内科技期刊 1989~1996 的检索显示,以随机振动为主要内容的研究论文超过 290 多篇,如将中国学者用英文发表的论文统计在内,则数目将大量增加。

这些研究具有如下几个主要的特点:

(1) 涉及到随机振动理论分析、计算方法的诸多方面,论文数量约占 94 篇。

(2) 紧密结合工程实际,解决工程中的问题,其中如涉及车辆工程(35 篇),结构工程(45 篇),地震工程(33 篇),海洋工程(17 篇)。

(3) 注重了实验测试与分析方法的结合,与测试信号分析有关的文章大约有 35 篇。

据粗略统计,作者的队伍已达 350 人以上,大量新生力量进入此一领域,说明了 10 多年来我国人材培养在此一领域取得了很大的成绩。

在如下诸多领域内取得的显著进展有:

• 非线性随机振动领域

FRK 方程求解、等效线性化方法、矩方程方法、函数项级数展开、数字模拟等数值计算方法有深入研究,其中如使用逐步消除法对方程惯性解耦后与累积量截断技术相结合的矩方程数值求解达到了国际水平^[17~19,44,56,60,64,69,76,78,83,85,97]。

• 非平稳随机振动领域

工程中存在大量非平稳随机激励,如地震、风、车辆和飞行器的起降阶段等,将问题简化为平稳过程许多情形下是不准确的。我国学者结合这些工程实际问题的处理,在理论分析和计算方法方面作了大量工作,如在大跨度结构受演变随机激励且考虑到行波效应时考虑地震的非平稳性,得到简单有效的算法^[21];在已知输入随机量的方差、均值变化时通过解协方差、均值微分方程求解响应的方差和均值^[40,75];探索使用正交函数展开法解算非平稳 FPK 方程^[83];研究了非平稳激励下的结构可靠性^[87];发展了数字模拟方法^[100]。这方面的研究文献说明我国 10 年来在此领域的研究是活跃的并取得了很大成绩^[46,49,63,70,74,84,88,89,93,94]。

• 时域直接积分的数值方法

其中与分段等效线性化技术相结合的时域积分法,如随机中心差分,随机纽马克积分方法及由钟万勰提出的精细时程积分方法(已由林家浩等扩展到随机振动领域),已达到国际先进水平^[21,42,58]。

• 随机分叉和随机浑沌,参数随机振动系统

其中参数随机振动系统内部的非线性冲击激励使系统的响应输出迅速进入浑沌态已经为浑沌振动的控制和工程应用开辟了新的前景^[98,99]。

• 测试技术与分析软件

国内早期主要引进国外的数字信号分析仪,近年来我国在发展相关分析软件,实现仪器计算机化方面取得重要进展。其中如南京汽轮高新技术开发公司的郑万泔等发展的 CRAS 已更新到第四代产品,开办了 10 次研讨班活动,该产品已广泛应用于实时控制测量,工程系统故障诊断等许多生产部门。

• 随机有限元方法

传统的随机振动主要考虑的是激励的随机性。由于系统结构参数的不确定性而引发的问题,在80年代已发展为空间离散的随机有限元方法,其中随机场的平均、插值,数字模拟方法,多项式正交展开,摄动方法的综合应用已得到充分的扩展。我国近年来已有16篇随机有限元方面的论文发表,动力随机有限元也从时域直接积分与空间离散随机有限元的结合而取得了初步的成果。随机有限元方法已比较广泛地应用于岩土工程、土木水利建筑等领域,并渗透到食品加工和水土关系等传热传质领域中^[19,20,24,31,32,34]。

下面将结合摄动法动力方程分离和时间离散的时域直接积分,介绍时域有限元和空间有限元相结合的动力随机有限元的一些进展。

(1) 运动方程的摄动法分离及动力响应计算

考虑系统的线性(或等效线性化)方程:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (1)$$

其中 M 、 C 、 K 分别是质量、阻尼、刚度矩阵且含随机场分布的不确定性, $F(t)$ 是激励, \ddot{x} 、 \dot{x} 、 x 分别是加速度、速度和位移矢量。

令 $b(u)$ 是随空间坐标 u 变化的材料特性随机变量,可展成为确定性形函数 $\psi(u)$ 的近似展开式:

$$b(u) = \sum_{i=1}^q \psi_i(u) b_i \quad (2)$$

b_i 为 $b(u)$ 在空间随机分布的节点 u_i , $i = 1, \dots, q$ 上的值,其均值和方差可定义为:

$$\bar{b}(u) = \sum_{i=1}^q \psi_i(u) \bar{b}_i \quad (3)$$

$$\text{var}(b(u)) = \sum_{i,j=1}^q \psi_i(u) \psi_j(u) \text{cov}(b_i, b_j) \quad (4)$$

其中: \bar{b}_i 和 $\text{cov}(b_i, b_j)$ 分别为 b_i 的均值和 b_i, b_j 的协方差。为数学利用方便使用了下列的数学符号,并记 ϵ 为小参数。

$$db_i = \epsilon(b_i - \bar{b}_i), \quad db_i db_j = \epsilon^2 (b_i - \bar{b}_i)(b_j - \bar{b}_j)$$

$$\bar{g}(X) = g(Z, \bar{b}(X)),$$

$$\frac{\partial \bar{g}}{\partial b_i} = \frac{\partial \bar{g}(\bar{b}_i, \bar{b}_j)}{\partial b_i} \quad \Delta \bar{g}_1 = \sum_{i=1}^q \bar{g}_{b_i} db_i \quad \Delta \bar{g}_2 = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^q \bar{g}_{b_i b_j} db_i db_j \quad (5)$$

对方程(1)的系数矩阵和各矢量采用泰勒级数展开到二阶,可写作:

$$X \simeq \bar{X} + \Delta \bar{X}_1 + \Delta \bar{X}_2 \quad K \simeq \bar{K} + \Delta \bar{K}_1 + \Delta \bar{K}_2$$

$$X \simeq \bar{X} + \Delta \bar{X}_1 + \Delta \bar{X}_2 \quad C \simeq \bar{C} + \Delta \bar{C}_1 + \Delta \bar{C}_2$$

$$X \simeq \bar{X} + \Delta \bar{X}_1 + \Delta \bar{X}_2 \quad F \simeq \bar{F} + \Delta \bar{F}_1 + \Delta \bar{F}_2$$

当外激励与材料参数无关时 $\Delta \bar{F}_1 = \Delta \bar{F}_2 = 0$, 即 $\bar{F} = F$ 并注意到 $d\bar{b}_i = 0$ 。方程(1)可以分离为0阶、1阶和二阶摄动方程。

$$M\bar{X} + \bar{C}\dot{\bar{X}} + \bar{K}\bar{X} = F \quad (6)$$

$$M\Delta \bar{X}_1 + \bar{C}\Delta \dot{\bar{X}}_1 + \bar{K}\Delta \bar{X}_1 = -\Delta \bar{C}_1 \dot{\bar{X}} - \Delta \bar{K}_1 \bar{X} \quad (7)$$

$$M\Delta \bar{X}_2 + \bar{C}\Delta \dot{\bar{X}}_2 + \bar{K}\Delta \bar{X}_2 = -\Delta \bar{C}_1 \Delta \dot{\bar{X}}_1 - \Delta \bar{K}_1 \Delta \bar{X}_1 - \Delta \bar{C}_2 \Delta \dot{\bar{X}} - \Delta \bar{K}_2 \Delta \bar{X} \quad (8)$$

方程(7)也可写作:

$$M \frac{\partial \bar{X}}{\partial b_i} + \bar{C} \frac{\partial \dot{\bar{X}}}{\partial b_i} + \bar{K} \frac{\partial \bar{X}}{\partial b_i} = \hat{F} \quad (9)$$

$$\text{其中} \quad i = 1, \dots, q, \quad \hat{F} = -\frac{\partial \bar{C}}{\partial b_i} \bar{X} - \frac{\partial \bar{K}}{\partial b_i} \bar{X} \quad (10)$$

且 $\frac{\partial \bar{C}}{\partial b_i}, \frac{\partial \bar{K}}{\partial b_i}$ 即 $\Delta \bar{C}_1, \Delta \bar{K}_1$ 分别称作阻尼和刚度对材料参数随机变量的一阶敏感函数。

设系统的响应是零均值的, 即 $\langle \bar{X} \rangle = \langle \dot{\bar{X}} \rangle = 0$, 忽略响应方差和协方差中三阶及三阶以上的项, 则系统在受随机激励时的位移及速度响应方差为:

$$\langle \bar{X} \bar{X}^T \rangle = \langle \bar{X} \bar{X}^T \rangle + \sum_{i,j=1}^q \langle (\frac{\partial \bar{X}}{\partial b_i}) (\frac{\partial \bar{X}}{\partial b_j})^T \rangle \text{cov}(b_i, b_j) \quad (11)$$

$$\langle \dot{\bar{X}} \dot{\bar{X}}^T \rangle = \langle \dot{\bar{X}} \dot{\bar{X}}^T \rangle + \sum_{i,j=1}^q \langle (\frac{\partial \dot{\bar{X}}}{\partial b_i}) (\frac{\partial \dot{\bar{X}}}{\partial b_j})^T \rangle \text{cov}(b_i, b_j) \quad (12)$$

其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示数学期望, cov 表示协方差, 显然方程(6)~(8)中左端的系数矩阵相同, 而(7)、(8)中右端的伪载荷在 C, K 的各阶敏感函数已知的情形下, 各由前一阶方程求解后很方便地得到, 因此, 这些方程可以使用同一时域数值积分程序进行计算求解, 很方便。

(2) 时域直接积分方法计算位移速度响应方差

上面关键问题是如何计算方程(11)、(12)中的 $\langle \bar{X} \bar{X}^T \rangle, \langle (\frac{\partial \bar{X}}{\partial b_i}) (\frac{\partial \bar{X}}{\partial b_j})^T \rangle, \langle \dot{\bar{X}} \dot{\bar{X}}^T \rangle, \langle (\frac{\partial \dot{\bar{X}}}{\partial b_i}) (\frac{\partial \dot{\bar{X}}}{\partial b_j})^T \rangle$ 。文献[18]详细论述了对非线性系统随机激励(白噪音或调制白噪音激励下)位移及速度方差的计算, 分别可采取随机中心差分方法或随机 Newmark 方法得到。

对系统运动方程:

$$m\ddot{x} + g(x, \dot{x}) = W(t) \quad (13)$$

$g(x, \dot{x})$ 代表系统的非线性部分, $W(t)$ 为随机激励。

如果方程是惯性解耦, 且为线性时, 则可用快速富里叶变换和快速卷积方法等方便地求取响应。当系统为非线性时, 则可采取分段等效线性化技术, 将方程写作在一段时间间隔内等效的线性方程

$$M\ddot{x}_s + C_s \dot{x}_s + K_s x_s = P_s \quad (14)$$

其中

$$C_s = E[\frac{\partial}{\partial \dot{x}} g(x, \dot{x})], \quad K_s = E[\frac{\partial}{\partial x} g(x, \dot{x})] \quad (15)$$

采用中心差分的离散格式可以得到系统位移和速度响应方差

$$R_{s+1} = \langle X_{s+1} X_{s+1}^T \rangle = N_2 R_s N_2^T + N_3 R_{s-1} N_3^T + N_2 D_s N_3^T + N_3 D_s^T N_2^T + \Delta t^4 N_1 B_s N_1^T \quad (16)$$

$$R_{s+1} = \langle \dot{X}_{s+1} \dot{X}_{s+1}^T \rangle = (1/4\Delta t^2) (N_2 R_{s+1} N_2^T + 4N_4 R_s N_4^T - 2N_2 D_{s+1} N_4^T - 2N_4 D_{s+1}^T N_2^T + \Delta t^4 N_1 B_{s+1} N_1^T) \quad (17)$$

其中 $D_s = \langle X_s X_{s-1}^T \rangle$ $D_s = \langle X_{s-1} X_s^T \rangle$ $B_s = \langle P_s P_s^T \rangle$ $D_s = N_2 R_{s-1} + N_3 D_{s-1}^T$

$$D_s^T = R_{s-1}^T N_2^T + D_{s-1} N_3^T$$

$$N_1 = [M + C_s \frac{\Delta t}{2}]^{-1} \quad N_2 = N_1 (2M - K_s \Delta t^2)$$

$$N_3 = N_1 (\frac{1}{2} \Delta t C_s - M) \quad N_4 = N_1 M$$

注意到在白噪音激励下

$$B_{s+1} = \langle P_{s+1} P_{s+1}^T \rangle = 2\pi s_0 / \Delta t \quad (18)$$

也可采用 Newmark 隐式差分格式也可以得到位移与速度响应方差的迭代计算公式:

$$R_{s+1} = K_s^{-1} (A_1 R_s A_1^T + A_2 \dot{R}_s A_2^T + A_3 \ddot{R}_s A_3^T + A_3 D_s^T A_1^T + B_{s+1}) (K_s^{-1})^T \quad (19)$$

$$\dot{R}_{s+1} = B_1^{-1} (K_s R_s K_s^T + B_2 \dot{R}_s B_2^T + B_3 \ddot{R}_s B_3^T + B_3 D_s^T K_s^T + B_{s+1}) (B_1^{-1})^T \quad (20)$$

$$\ddot{R}_s = M^{-1} (C_s \dot{R}_s C_s^T + K_s R_s K_s^T + B_s) (N^{-1})^T \quad (21)$$

其中

$$A_1 = \frac{M}{\beta \Delta t^2} + \frac{\gamma C_s}{\beta \Delta t}$$

$$A_2 = \frac{M}{\beta \Delta t} + (\frac{\gamma}{\beta} - 1) C_s$$

$$A_3 = \frac{M + C_s \gamma \Delta t}{2\beta} - M - C_s \Delta t$$

$$B_1 = C_s + \frac{1}{\gamma \Delta t} (K_s \beta \Delta t^2 + M)$$

$$B_2 = K_s \Delta t - \frac{1}{\gamma \Delta t} (K_s \beta \Delta t^2 + M)$$

$$B_3 = K_s (\frac{1}{2} - \beta) \Delta t^2 - \frac{1 - \gamma}{\gamma} (K_s \beta \Delta t^2 + M)$$

注意到隐式的 Newmark 差分格式运算中稳定性对步长的选择要求没有限制,但对非线性情形每一步迭代运算都要涉及刚度和 B_1 矩阵的求逆,参数选择也比中心差分方法复杂,无疑增加了计算量,实际上步长的选择也受到采样定理的限制。

文献[19]给出二自由度数值算例结果表明刚度的随机变化约 10% 时,引起的位移响应方差变化约 17%,同时所给出梁的 12 单元 33 个自由度算例在转角位移方差的影响更达到 25%,因此材料的参数随机变化对响应有相当大的影响。

2 发展前景

工程结构的非确定分析具有非常重要的意义。事物之间因果关系的不确定性和某些信息的不确定性(包括随机性、模糊性和未确知性)正在得到普遍的承认,而由于系统的非线性所引起的确定性系统本身的内在随机性也由于近 20 年混沌理论的研究而逐步被揭示出来。随机振动理论是从严格意义上的随机过程理论和机械振动相结合发展起来的,在线性领域的理论和实验测试方法已经算是比较成熟,随着与其它学科结合随机振动已形成了内容十分丰富的学科,也带来了许多新的未知的领域。从这个意义上说,离它的最终目标还有一段艰难的历程。当今世界科学的发展潮流是多种学科的相互渗透,交叉和综合发展,随机振动的发展已经证实并将继续遵循这一路线前进。从大的方面不确定性的处理在工程系统的优化或合理化设计提出的工程软设计理论(王光远,1990)已经综合模糊随机振动理论、随机可靠性理论、优化设计方法和专家系统,这一领域仍将继续发展扩充和成熟起来。而非线性随机振动、随机分叉和随机混沌的诸多方面理论和实践也有待深入,时域离散化与空间离散化技术的结合的动力随机有限元方法也将不仅应用于系统的工程领域而将发展到相关的流体力学、传热传质等各种偏微分方程的求解,在解决具有不确定性和非线性的工程领域中,有着广阔的发展和前景。其中数字的采集、传感器、分析处理的数值方法软件和实验技术也是其重要的基础。

参 考 文 献

- 1 星谷胜. 随机振动分析. 地震出版社, 1977

- 2 D. E. 纽兰. 随机振动与谱分析概论. 机械工业出版社, 1980
- 3 S. D. 罗伯逊. 随机振动引论. 湖南科学技术出版社, 1980
- 4 B. A. 斯维特里兹基. 机械系统的随机振动. 高等教育出版社, 1986
- 5 U. C. 尼格敏. 随机振动概论. 上海交通大学出版社, 1985
- 6 某幼琛, 谢世浩. 随机振动的基本理论与应用. 湖南科学技术出版社, 1982
- 7 庄表中, 王行新. 随机振动概论. 地震出版社, 1982
- 8 庄表中, 陈乃立, 高 瞻. 非线性随机振动理论及应用. 浙江大学出版社, 1986
- 9 季文美, 方 同, 陈松琪等. 机械振动. 科学出版社, 1985
- 10 郑兆昌, 丁奎元. 机械振动. 中册, 第 14, 15, 16 三章. 机械工业出版社, 1986
- 11 王光远. 工程软设计理论. 科学出版社, 1992
- 12 陈予恕, 唐 云, 欧阳怡等. 非线性动力学中的现代分析方法第 6 章. 科学出版社, 1992
- 13 朱位秋. 随机振动. 科学出版社, 1992
- 14 张景绘, 王 超. 工程随机振动理论. 西安交通大学出版社, 1989
- 15 庄表中, 梁以德, 张佑启. 结构随机振动. 国防工业出版社, 1995
- 16 方 同. 工程随机振动. 国防工业出版社, 1995
- 17 张森文, 陈奎孚. 计算非线性系统响应方差的非高斯矩截断方法. 北京农业工程大学学报, 1992(2)
- 18 张森文, 陈奎孚, 赵洪辉. 多自由度强非线性耦合参激系统随机响应计算方法. 力学学报, 1993, 25(3): 362~368
- 19 张森文. 结构动力响应计算的随机有限元直接积分方法. 数学·物理·力学高新技术研究进展, 1996(6): 290~297
- 20 张森文, Uatla A. 用于食品传热分析的随机有限元方法. 农业工程学报, 1995(2)
- 21 林家浩, 李建俊等. 大跨度结构考虑行波效应时非平稳随机地震响应. 固体力学学报, 1996, 17(1): 65~68
- 22 丁 力. 机械电子设备随机振动试验的应用. 航空计算技术, 1996, 26(2): 59~64
- 23 李 杰. 复合随机振动分析的扩阶系统方法. 力学学报, 1996, 28(1): 66~75
- 24 姚耀武, 申 超. 非线性随机有限元法及其在可靠度分析中的应用. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 37~46
- 25 贾建援, 曹玉玲等. 以随机响应为目标的方舱结构动力修改. 应用力学学报, 1996, 13(2): 49~55
- 26 冯 奇, 沈荣瀛. 随机振动动力吸振器设计. 噪声与振动控制, 1996(1): 4~8
- 27 殷雪岩. 随机振动试验技术研究. 北京航空航天大学学报, 1995, 21(4): 119~123
- 28 林家浩, 沈为平等. 受演变随机激励结构响应的精细逐步积分法. 大连理工大学学报, 1995, 35(5): 600~605
- 29 王永平, 张际春等. 车队荷载作用下简支梁桥动力响应的实验与理论研究. 工程力学, 1995(增刊/下): 1511~1516
- 30 王荣辉, 郭向荣等. 准高速列车—钢筋混凝土框架桥的横向随机振动分析. 工程力学, 1995(增刊/中): 1174~1186
- 31 秦 权. 随机有限元及其进展: II. 可靠度随机有限元和随机有限元的应用. 工程力学, 1995, 12(1): 1~9
- 32 张新培. 改进的随机有限元方法. 固体力学学报, 1995, 16(1): 56~60
- 33 郑大平. 航空发动机随机振动试验. 航空科学技术, 1995(6): 20~22
- 34 刘 宁, 吕泰仁. 随机有限元及其工程应用. 力学进展, 1995, 25(1): 114~126
- 35 瞿张锋. 直升机周期振动及导弹发射振动随机性分析. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(6): 726~731
- 36 周继铭, 程悦荪. 拖拉机-挂车机组非线性系统随机响应分析. 农业机械学报, 1995, 26(4): 21~26
- 37 胡群芳. 随机振动与轻工设备故障诊断. 轻工机械, 1995(1): 34~36
- 38 简林轲, 何 铨. 随机振动波形再现控制系统设计与实现. 信号处理, 1995, 11(1): 2~6
- 39 吴再光. 具有随机参数的动力系统随机地震响应分析. 应用力学学报, 1995, 12(1): 90~93
- 40 曾永珠, 王放明等. 自动武器非平稳随机振动响应及其射击密集度研究. 应用力学学报, 1995, 12(1): 71~75
- 41 欧进萍, 吴 波. 弹塑性随机振动系统中恢复力学数学模型的若干形式. 应用力学学报, 1995, 12(1): 63~70

- 42 林家浩,沈为平等. 结构非平稳随机响应的混合型精细时程积分. 振动工程学报,1995,8(2):127~135
- 43 贾民平,钟秉林等. 一种随机振动模型结构辨识方法. 振动工程学报,1995,8(3):264~268
- 44 彭解华,陈树年等. 一类非线性系统随机振动的等效线性化. 振动与冲击,1995,14(1):30~35
- 45 张相庭. 重大工程结构随机振动分析中基于功能原理的团集等效体系的研究. 振动与冲击,1995,14(2):7~11
- 46 耿遵敏,宋绍强等. 非平稳随机振动分析及诊断的应用研究. 动态分析与测试技术,1994,12(4):11~15
- 47 张文首,李建俊等. 多相位激励随机地震响应快速算法. 计算结构力学及其应用,1994,11(3):241~247
- 48 朱位秋. 非线性随机振动理论的近期进展. 力学进展,1994,24(2):163~172
- 49 张明. 非线性系统非稳态随机响应的一种计算方法. 西南交通大学学报,1994,29(5):482~487
- 50 陈炎,吴淇泰. 色噪声和周期激励作用下粒子在双热阱中的随机振动. 浙江大学学报:自科版,1994,28(2):154~161
- 51 方同,张天舒. 随机振动的复模态时域分析. 自然科学进展-国家重点实验室通讯,1994,4(1):109~112
- 52 周广春,孟繁中等. 质量和刚度非对称结构在水平双向地震作用下的随机反应. 哈尔滨建筑工程学院学报,1993,26(3):50~56
- 53 林宗祥. 随机振动应用于环境应力筛选技术中的几个问题. 航空精密制造技术,1993,29(6):36~39
- 54 谭东耀,杨庆山等. 空间相关过滤白噪声激励下结构的随机振动离散分析方法. 计算结构力学及应用,1993,10(2):157~166
- 55 萧鹤麟,吕子华等. 剪切型高层建筑结构对地震的随机响应分析. 土木工程学报,1993,26(3):55~59
- 56 庄表中,蒋本感等. 一种改进了的矩闭合法及其在振动工程中的应用. 浙江大学学报:自科版,1993,27(5):604~612
- 57 蔡惠平,陈黎敏. 随机振动环境的缓冲包装. 包装工程,1992,13(3):119~121
- 58 张森文,赵洪辉. 非线性随机振动响应时域直接积分方法中步长的选择. 北京农业工程大学学报,1992,12(1):33~39
- 59 王放明,陆家鹏等. 火箭炮射击时冲击力随机特性研究. 弹道学报,1992(3):51~57
- 60 杜成斌,赵光恒. 求解非线性随机振动的一种新的加权等价线性化方法. 工程力学,1992,9(2):12~22
- 61 谭东耀. 随机振动离散分析方法. 力学与实践,1992,24(4):473~479
- 62 刘晓云,吕澎民. 偏载车辆垂向随机振动分析及二系悬挂参数的优化设计. 铁道车辆,1992(11):9~12
- 63 李宏男,王苏岩. 求解多维地震作用下结构随机反应的一种有效方法. 振动工程学报,1992,5(2):162~167
- 64 张相庭. 等平方能量法计算非线性结构随机振动. 振动与冲击,1992,11(1-2):38~42
- 65 王光远,欧进萍. 含模糊参数的随机振动. 固体力学学报,1991,12(3):208~217
- 66 杨庆山,谭东耀. 随机荷载的空间和时间相关性的统一处理. 哈尔滨建筑工程学院学报,1991,24(4):25~31
- 67 李宏男,陆鸣. 高层建筑随机地震反应分析. 沈阳建筑工程学院学报,1991,7(2):123~130
- 68 郑松林,冯锡曙. 拖拉机驾驶室随机振动环境室内模拟的研究. 拖拉机,1991(3):19~23
- 69 方建杰,方同. 随机振动的一种加权等价线性化方法. 应用力学学报,1991,8(3):114~120
- 70 张希农. 非高斯随机激励下工程结构可靠性估计的一种方法. 应用力学学报,1991,8(4):50~55
- 71 张德澄,王燕昌. 场地地震液化的随机振动分析方法. 宁夏大学学报:自科版,1990,11(2):51~58
- 72 裴峻峰,张嗣伟. 风荷载作用下石油井架的动力可靠性研究. 石油大学学报,1990,14(6):42~43
- 73 徐幼麟,俞载道. 随机临界地震响应分析. 同济大学学报,1990,18(1):11~19
- 74 金先龙. 非平稳随机振动信号的瞬时功率谱分析. 振动工程学报,1990,3(3):25~32
- 75 王放明,申正宾. 非平稳随机振动分析的协方差矩阵法. 振动与冲击,1990,9(2):50~55
- 76 朱位秋,余金寿. 预测非线性系统随机响应的等效非线性系统法. 固体力学学报,1989,10(1):34~44
- 77 安应琪. 一类非线性系统对随机地震激励的响应. 河北工学院学报,1989,18(4):39~50
- 78 刘荣忠. 非线性随机参数激励系统的矩稳定性研究. 华东工学院学报,1989(3):101~106
- 79 胡斌,贺北斗等. 火箭炮随机振动起始扰动分析法. 华东工学院学报,1989(3):39~45

- 80 曲陆臣. 随机振动试验的阻抗等效. 环境条件与试验, 1989(2):12~16
- 81 朱位秋. 结构的宽带随机振动. 力学进展, 1989, 19(4):477~484
- 82 方同, 张天舒. 计算响应谱矩的复模态方法. 力学学报, 1989, 21(1):65~74
- 83 方丹萍, 张惠侨等. 用矩阵连分法求解非平稳的 FPK 方程. 上海交通大学学报, 1989, 23(4):78~89
- 84 王超, 张希农等. 随机振动的信息量及最大熵概率估计. 应用力学学报, 1989, 6(2):76~80
- 85 余锬, 沈德安. 滞回系统随机振动的累积量截断法. 振动与冲击, 1989(2):1~11
- 86 李东风. 随机振动试验中的谱估计检验. 振动与冲击, 1989, 8(4):44~48
- 87 王超, 徐晖等. 非平稳激励下结构动力可靠度计算. 西安交通大学学报, 1993, 27(4):47~52, 20
- 88 曹宏, 李秋胜等. 随机结构动力反应和可靠性分析. 应用数学和力学, 1993, 14(10):931~938
- 89 张希农. 非高斯随机激励下工程结构可靠性估计的一种方法. 应用力学学报, 1991, 8(4):50~55
- 90 李秋胜, 曹宏. 抗震结构的模糊随机反应及模糊可靠性分析. 应用力学学报, 1990, 7(3):73~80
- 91 瞿张锋. 直升机周期振动及导弹发射振动随机性分析. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(6):726~731
- 92 金新阳. 最大熵谱法及其在随机信号处理中的应用. 建筑科学, 1989(5):24~28
- 93 欧进萍, 段宇博. 结构抗风可靠度分析与设计的等效随机静风荷载. 建筑结构, 1995(7):27~33, 42
- 94 裴峻峰, 张嗣伟. 风荷载作用下石油井架的动力可靠性研究. 石油大学学报, 1990, 14(6):42~43
- 95 李俊兴, 方钟圣. 由航行中的船体运动实时推算海浪谱(第二篇报告)——方向波谱的推算. 舰船力学情报, 1994(7):28~36
- 96 李良福. 海浪的非线性效应对波浪载荷的影响. 舰船力学情报, 1993(11):41~46
- 97 张森文, To CWS. 二自由度结构非线性随机振动响应计算的 ITO 积分综合方法, 1989, 9(2):105~110
- 98 龙运佳, 欧阳怡等. 强非线性水平混沌振动台. 农业工程学报, 1997, 12(1):109~113
- 99 龙运佳, 张平等. 强非线性宽频带混沌激励器及其应用. 农业工程学报, 1995, 11(4):43~47
- 100 张森文, To CWS. 非线性系统响应计算的一种数字模拟方法. 振动工程学报, 1989, 2(1)
- 101 陈塑寰. 随机参数结构的振动理论. 吉林科学技术出版社, 1992
- 以下参考文献(共 277 篇)略。

(上接第 17 页)

参 考 文 献

- 1 Foss K A. Coordinates which uncouple the equations of damped linear dynamic systems. *Journal of Applied Mechanics*, 1958, 25(2)
- 2 Merovitch I. *Analytical methods in vibration*, 1967
- 3 Fawzy I, Bishop R E D. On the dynamics of linear nonconservative systems. *Proceedings of Royal Society, London A* 352, 1976
- 4 胡海昌. 多自由度线性阻尼系统的振动问题. *固体力学学报*, 1980(1)
- 5 郑兆昌等. *机械振动(上册)*. 机械工业出版社, 1980
- 6 倪金福, 张阿舟. 关于复模态理论的几个问题. *南京航空学院学报*, 1982(3)
- 7 季文美等. *机械振动*. 科学出版社, 1985
- 8 何衍宗. 柔性转子在周期参数激励下的稳定性分析. *全国第三届转子动力学学术讨论会论文集*, 山东青岛, 1992
- 9 侯之超. 大型结构动力分析中的数值方法. *清华大学博士学位论文*, 1995

RESEARCH ADVANCES OF RANDOM VIBRATION IN CHINA FOR LAST TEN YEARS

Zhang Senwen

(China Agricultural University)

Zhuang Biaozhong

(Zhejiang University)

Ouyang Yi

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science)

Zheng Wangan

(Nanjing Turbine Manufacture)

Abstract The advances in theory, experiment and applied field of random vibration for last 10 years in China were reviewed, especially, the development of stochastic finite element method (SFEM) combined with the integration in time domain was introduced in detail in this paper. The prospect on development of random vibration in China in the future was also given.

Key words: vibration engineering, random vibration, development review

TEST ANALYSIS TO THE COUPLED BENDING AND TORSIONAL VIBRATION OF ASYMMETRICAL SHIP HULL

Zhao Ye Ye Wei Yu Guoxin Lu Xinsen

(Shanghai Jiao Tong University)

Abstract In order to verify the validation of a FEM model of thinwalled beam, which takes effects of warping, shearing, rotation of cross-sections and structural discontinuity into account, an special experiment on coupled bending and torsional vibration is carried out on an aircraft carrier model. An analysis to the results is presented in the paper. Good agreement between the test data and calculation data shows the validation and the suitability of the computation model and the experimental method.

Key words: asymmetrical hull structure, coupled bending and torsional vibration, test analysis

ON THE CONDITIONS FOR LINEAR SYSTEMS TO AVOID RESONANCE

Hou Zhichao Zheng Zhaochang

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing)

Abstract It is widely accepted that the frequencies of external forces are neither equal nor near to any eigenvalue of a linear system without damping, so as to prevent it from resonance. Based upon further investigation in the paper, a more general statement has been made, through which the authors try to answer such questions as follows: Must a resonance occur for the non-damped linear system when a frequency of the forces equals to some eigenvalue? How about