

断裂、智能结构、非线性振动、不确定分析凸集理论研究的新进展

沈亚鹏 徐健学 张景绘 陈宜亨

西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049

按照国家实验室学术委员会确定的研究方向, 在 1997年中, 我室在以下的研究工作中取得了重要成果

1 微裂纹屏蔽机理的力学理论

颗粒增强陶瓷材料(例如 SiC-TB₂)中宏观裂纹尖端过程区的微裂纹群抑制着宏观裂纹的扩展, 即所谓微裂纹屏蔽机理(shielding effect). 这是脆性材料四大强韧化的因素之一. Evans, Hutchinson, Ortiz等在80年代中后期, Faber, Cai在90年代初均作了研究. 主要有两种研究方法: 即连续体损伤力学方法和离散模型结合连续体损伤力学方法. 我室在国家自然科学基金和固体力学博士点基金资助下, 多年来在这方面作了深入的研究, 取得了较大的成果, 发表论文三十余篇. 对过程区尺寸、单位体积内微裂纹条数、非弹性体膨胀、各向异性化程度、归一化载荷间的内在联系作了定量分析^[1]. 最重要的突破进展是发现了 J_k 向量投影定理^[2, 3], 并证明这个定理在脆性材料、金属/陶瓷两相材料、纤维增强复合材料中均成立^[4-11]. 最近又证明在热压电材料中也成立. 这个定理纠正了Hermann(A.S.M.E.J. A. M. 1981)对 J_k 向量第二分量的轻视, 证明 J_2 和 J_1 一样在微裂纹损伤和屏蔽问题中发挥重要作用, 即对应着过程区有效弹性模量下降和残余应力释放这两个能量耗散过程. 这个定理也纠正了Ortiz(1987, 1988, 1989 A.S.M.E.J. A. M.)应用连续体损伤力学在屏蔽问题时的失误(他认为 $J_2 = J_1$). 由此还发现纤维增强复合材料中 J_2 的显函数表达式及Bueckner功共轭积分和 L 、 M 、 J_k 间的内在关系^[4, 5]. 系统地研究了各类守恒积分在微裂纹损伤和屏蔽中的作用, 指出了外场 J 在跨越微裂纹损伤区向主裂尖传递时是有损失的. 这个损失可由 J_k 的投影和来描述.

2 非线性动力学及机电耦联

2.1 非线性动力系统的分岔

得出一个四阶高阶退化非线性动力学系统的余维三分岔及其简化情形, 一对纯虚特征值和一个简单零

特征值的余维二分岔不完全规范形的开折和分岔结果, 对Shanley型弹塑性梁动力学反直觉行为给出了合理解释^[12]. 应用固有多尺度谐波平衡法及奇异理论, 对轴系联轴器具有双线性迟滞特性的大型汽轮发电机机电耦合次同步振荡(SSO)系统, 得出分岔的转迁集和扰动分岔图, 揭示了迟滞对系统Hopf分岔有明显的作用, 可以产生多分岔解和二次分岔^[13]. 给出强迫van der pol振荡一参数平面上全局分岔结构, 揭示了吸引域渐变机制和多种分岔、亚谐子区交迭、混沌子区嵌入等复杂机制的简单和复杂过渡区的划分规律^[14].

2.2 非线性动力系统的全局分析

提出全局分析的胞参照点映射法及迭代法理论和多尺度参照技术, 由定义的子域的轨道信息给出子域局部动力学, 达到点映射的计算精度并大大减少计算量; 方法不只在确定性的吸引域有效, 还有揭示新动力学性质的潜力^[15, 16]. 提出了全局分析的有限元映射法^[17]. 用广义胞映射法得出参数不确定性对吸引子共存系统全局性质的影响及由保护层厚度判断不确定性增大时首先消失的吸引子的工程完整性分析^[18]. 得出广义胞映射-图论方法对应关系的数学证明及应用的结果.

2.3 非线性控制系统的分岔和混沌及混沌控制

得出非线性Duffing振荡PD控制系统存在全局稳定不动点及Hopf分岔的证明, 揭示了非线性情形下, 一些参数域PD控制可以施行, 而在参考输入非零时, 发生硬弹簧情况的混沌和软弹簧情况的分形吸引域边界, 此分形边界由Melnikov方法给出判别条件^[19]. 给出一类离散神经网络中“内依马克-沙克分岔”及控制混沌活动区域的规律^[20].

2.4 生物神经放电脉冲间期(ISI)时间序列的非线性分析

长期以来, 生物神经放电ISI变化, 由于无规则性, 被当作随机现象, 阻碍内在规律性的揭示, 文[21~24]的一系列工作, 通过对大白鼠损伤神经实验的ISI大量数据进行相空间重构等价系统, 分维、Lyapunov

指数特征量分析,特别是应用非线性预报及替代数据分析方法的分析,揭示了ISI序列的动力学系统确定性的证据,存在确定性混沌,及存在分岔和加周期分岔等重要结果

2.5 机电耦联

大型发电机组轴系与电网耦联次同步振荡是关系大型发电输电安全可靠运行的重要问题,对于考虑非线性的高维情况,提出Hopf分岔识别的半解析半数值方法,给出11维系统正常参数范围存在1到2个Hopf分岔点及使分岔点分布合理的参数选取方法^[25];提出基于非线性模态不变流形思想的适用于机械系统(偶数维)和机电耦联系统(奇数维)的Hopf分岔解的方法,具有无需求出全部特征值和特征向量等优点,并用于11维系统分岔解及其稳定性分析,指出SSO系统Hopf分岔点都具有超临界性质^[26~28]。提出电磁场对结构和机械构件裂纹、应力奇异性的特殊影响的分析及结果^[29]。

3 振动凸集理论

用凸集对复杂动力学系统的不确定性建模,讨论系统及其响应的特性,是振动凸集理论研究的范畴,包括:系统响应集合的分析;系统隶属识别理论;特征值区间分析;振动系统的鲁棒稳定性及鲁棒控制;以及工程应用。文[30]综述了有关问题,试图建立振动凸集理论的基本框架

系统中的不确定性来自多方面,可以用不同类型的数学工具建模。文[31]是一个国际会议的专题报告,介绍三种不确定性凸集模型,它们分别在处理载荷响应分析、 H 振动控制及特征值区间分析时采用。在抗震工程中,文[32]提出了不确定地震载荷的傅立叶椭圆建模方法,包括数学表达形式及参数的选择方法,并在后继的研究中应用该模型讨论了各种结果及实际结构

系统对凸集建模载荷的响应集合的分析,已经得到一系列结果:

- 建立了系统响应集合、最坏响应等基本概念,经典的共振概念是最坏响应的一个特定情况
- 得到单自由度系统响应集合的解析解^[32]。
- 提出并发展了求解线性时不变系统响应集合的支撑超平面法^[33,34]。
- 研究非线性系统稳定响应集合数值计算方法

振动鲁棒控制是振动凸集理论的一个重要分支,讨论了 H 振动控制算法及实现。不确定性瞬态振动的控制是一个难点,至今已有的文献中所发展的振动控制策略只对稳态振动控制有较好的效果,不能有效地

抑制最大冲击响应, $L_1(1)$ 控制研究已有所进展,是瞬态振动(冲击)控制的基础性研究

振动凸集理论在结构抗震工程中的应用,是近期研究的重点,文[35]应用地震载荷的傅立叶椭圆模型及支撑超平面法,详细计算和分析一幢25层楼房的地震响应问题,将最坏响应与现行规范中由反应谱法及时程分析的结果相比较,数据表明,在特定地震载荷下,依据现行规范的结构设计有可能导致不安全性问题。这个结果的发表,希望引起地震工程界的讨论,纠正振动凸集理论发展中的问题,并能促进结构地震设计新理论的发展

4 智能结构的力学分析

智能结构是在结构中集成传感、驱动及控制三个基本要素,赋予结构感知、判断、发出指令和执行动作,实现自检测、自诊断、自适应等某些智能功能与生命特征。文[36,37]综述压电类、形状记忆合金类智能结构力学分析的最新研究成果。近年来我室在压电类智能结构基础理论及应用研究中已取得良好成绩

4.1 电磁热弹性耦合场中的基本原理

文[38]综合并发展电磁热弹性耦合场中各类变分原理,如动静态下的势能原理、全能原理、Hu-Washizu广义变分原理和Hellinger-Reissner广义变分原理,建立线热释电弹性介质的互等功原理^[39]以及导出压电介质多种形式的守恒方程和路径无关积分^[40]。最近,笔者从非线性连续介质力学的基本理论出发,基于强耦合非线性电磁热理论(即弹性场和电场都是非线性),建立几种非线性率型变分方程,并得到热压电介质的Total Lagrange和Updated Lagrange变分方程及相应的有限元方程^[41]。

4.2 压电智能结构的解析解

为系统明了压电智能结构中电量、力学量的变化规律,并为评判各种数值解法的精确性,需要压电智能结构力学分析的解析解。基于三维弹性理论,运用幂级数法,在文[42~44]中,分别得到压电层合正交各向异性壳体柱形弯曲、有限长正交各向异性压电圆柱壳自由振动和有限长压电层合筒支板自由振动的精确解。并从三维弹性理论出发,求得压电圆柱壳体在外载和电场共同作用下线性屈曲的解析解^[45]。结果表明压电效应对屈曲临界载荷有显著影响,但是单独的电场作用不会导致壳体的弹性屈曲

4.3 压电智能结构的数值分析

文[46]中,已介绍我室在压电类智能结构系统中实现形状控制、振动主动控制和损伤监控有限元数值模拟方面的工作。以PVDF作为传感、作动器,利用模

态理论对弹性连杆机构的振动实施主动控制^[47]。此外将光纤传感器和压电作动器联合使用控制薄板的振动^[48]。文 [49] 研究了低速冲击下具有分布压电片的复合材料层合板的动态响应。克服 Lee 提出的模态传感和作动器设计中的严重缺点。文 [50] 发展一种新型的模态传感和作动器, 只需通过简单算法, 不仅可以控制单个模态, 而且可以方便地控制一组模态

4.4 压电介质的断裂分析

基于压电体三维问题的通解, 文 [51, 52] 中导出三维压电体的单位集中不连续电势和不连续位移的基本解, 成为三维压电体问题边界积分方法、边界元法的基础。从三维无限大压电介质中任意平板裂纹所做的分析, 再次表明裂尖处应力和电位移具有 $r^{-\frac{1}{2}}$ 的奇异性。采用积分降维方法, 进一步导出二维压电体的单位集中不连续电势和不连续位移基本解以及直线裂纹的边界积分方程^[53]。

5 航天结构振动控制一体化理论及技术

大型复杂结构的振动控制的关键问题是合适的减振元件及作动机构。粘弹性阻尼器的研制成功及设计理论的发展, 为航天工程可提供一类重量轻、成本低、阻尼效果甚佳的减振元件^[54], 该元件在实体仪器平台中试验证明效果很好。具有推力大、频率范围宽广特性的压电堆作动器的应用, 为大型柔性桁架结构振动主动控制提供了强有力的手段^[55]。

航天结构的一个型号件的振动控制实验已于97年正式启动, 实验包括了动特性测试、控制方案的实施、振动抑制效果的评价等。

主、被动组合振动控制的一个关键问题是相互影响。文 [56, 57] 讨论并试验了这个问题, 阻尼器和作动器位置的合理配置将可充分发挥它们对振动的抑制作用。

在新的一年里, 瞻望前景, 任重途遥, 需要我们更加发扬求实、创新精神, 夺取更为丰硕的科研成果。

参 考 文 献

- 1 Chen Y H, Hasebe N. Interaction between a main crack and microcracks in orthotropic solids. *Int J Solids Struct*, 1994, 31: 1877~ 1890
- 2 Chen Y H. On the contribution of discontinuities in a near-tip stress field to the J -integral. *Int J Engng Sci*, 1996, 34: 819~ 829
- 3 陈宜亨, 赵利果. 微裂纹屏蔽问题中守恒积分投影关系. *力学学报*, 1997, 29 (1): 47~ 53
- 4 陈宜亨, 马浩. 各向异性体 J_2 积分显函数表达式及应用. *中国科学, E 辑*, 1997, 27 (4): 310~ 317
- 5 陈宜亨, 师俊平. 微裂纹屏蔽机理的力学理论. *力学进展*, 1998, (1): 43~ 57

- 6 陈宜亨, 赵利果. 界面微裂纹屏蔽问题的 J_k 矢量投影守恒. *力学学报*, 1997, 29 (3): 359~ 364
- 7 陈宜亨. 高阶奇异性项及 J 积分. *力学学报*, 1997, 29 (2): 203~ 214
- 8 Zhao L G, Chen Y H. Effect of the T -stress in microcrack shielding problem. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1998, 65 (已清样)
- 9 Zhao L G, Chen Y H. Further investigation of subinterface crack. *A rchive of Applied Mechanics* (德国), 1997, 67: 393~ 406
- 10 Han J J, Chen Y H. On the contribution of a microhole in the near-tip stress field to the J -integral. *Int J Fracture*, 1997, 85 (2): 169~ 183
- 11 Zhao L G, Chen Y H. On the elastic T -term of a main-crack induced by near-tip microcracks. *Int J Fracture*, 1996, 82: 263~ 379
- 12 Xu J X, Hasebe R. Problems of an elastic-plastic beam dynamics and an incomplete codimensional two bifurcations. *Int J of Nonlinear Mech*, 1997, 32 (1): 127~ 143
- 13 Xu J X, Fu W P, Zhang X H. Bifurcation of the electromechanically coupled subsynchronous torsional oscillating system with hysteretic behavior. *Acta Mechanica Sinica*, 1997, 13 (1): 81-90
- 14 Xu J X, Jiang J. The global bifurcation characteristics of forced van der Pol oscillator. *Chaos, Solitons and Fractals*, 1996, 7 (1): 3~ 19
- 15 Jiang J, Xu J X. An iterative method of point mapping under cell reference for the global analysis of nonlinear dynamical systems. *J of Sound and Vibration*, 1996, 194 (4): 605~ 621
- 16 Jiang J, Xu J X. An iterative method of point mapping under cell reference for the global analysis: theory and a multiscale reference technique. Accepted by *J of Nonlinear Dynamics*, 1998, 13:
- 17 江俊, 欧阳容冰, 徐健学. 非线性动力系统全局分析的有限元映射法. *非线性动力学学报*, 1997, 4 (1): 55~ 61
- 18 龚璞林, 徐健学. 用广义胞映射研究参数不确定的多吸引子共存系统. *应用数学和力学杂志录用 (中、英文版)*
- 19 Cui F S, Chew C H, Xu J X, Cai Y L. Bifurcation and chaos in Duffing oscillator with a PD controller. *J Nonlinear Dynamics*, 1997, 12: 251~ 262
- 20 何岱海, 徐健学. 离散神经网络中的分岔、混沌及控制混沌. *非线性动力学学报*, 1997, 4 (4): 337~ 345
- 21 Xu J X, Gong Y F, Ren W, Hu S J, Wang F Z. Propagation of periodic and chaotic action potential trains along nervous fiber. *Physical D*, 1997, 100: 212~ 225
- 22 Gong Y F, Xu J X, Ren W, Hu S J, Wang F Z. Determine degree of chaos from analysis of ISI time series in nervous system. *Biological Cybernetics*, 1998, (1)
- 23 Gong Y F, Xu J X, Ren W, Hu S J, Wang F Z. Application of nonlinear forecasting method to the anal-

- ysis of interspike intervals in nervous system. *Acta Biophysica*, 1997, 13 (1): 55~ 61
- 24 龚云帆, 徐健学 混沌信号与噪声 信号处理, 1997, 13 (2): 112~ 118
- 25 傅卫平, 徐健学, 蒋耀林 高维机电耦合系统Hopf分岔的识别 西安交通大学学报, 1997, 10 (1): 21~ 28
- 26 傅卫平, 徐健学 应用非线性模态方法分析机电耦合次同步扭振系统Hopf分岔 中国电机工程学报, 1997, 17 (3): 175~ 178, 189
- 27 傅卫平, 徐健学 模态不变流形方法与机电耦合次同步扭振系统Hopf分岔 应用力学学报, 1997, 14 (4): 7~ 13
- 28 傅卫平, 徐健学 研究一类高维系统Hopf分岔解的模态不变流形方法 振动工程学报, 1997, 10 (1): 21~ 28
- 29 Xu J X, Hasebe N. The stresses in the neighborhood of a crack tip under effects of electromagnetic forces *Int J of Fractures*, 1995, 73: 287~ 300
- 30 张景绘, 何彩英 不确定性振动凸集理论的研究 力学进展, 1998, 28 (3)
- 31 Zhang J H, He C Y, Xie S L. Robust vibration analysis and control A invited report in workshop "Modeling and Reality-The Role of Learning and Self-organization", July, 1998, 27~ 30, Gemany
- 32 何彩英, 张景绘 地震响应的凸集分析 应用数学与力学 1997, 18 (10): 879~ 884
- 33 何彩英, 张景绘 求解多自由度振动系统响应集的支撑超平面法 振动工程学报, 1997, 10 (3): 300~ 306
- 34 何彩英, 张景绘 多自由度振动系统的一类凸集响应 力学学报, 1997, 29 (5): 530~ 539
- 35 He C Y, Zhang J H. Discussion for a New Result of Seismic Checking Computation. The Sixth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Jan 14~ 16, 1998
- 36 尹林, 沈亚鹏 压电类智能结构的力学行为和工程应用 力学进展, 1998, 28 (2): 163~ 172
- 37 高山, 沈亚鹏, 许德刚 形状记忆合金及其工程应用中的力学分析 力学进展, 1997, 27 (3): 301~ 312
- 38 王晓明, 沈亚鹏 电磁热弹性介质的一些基本理论 应用力学学报, 1995, 12 (2): 28~ 39
- 39 王晓明, 沈亚鹏 关于线性热释电弹性介质的互等功定理及应用 力学学报, 1996, 28 (2): 244~ 250
- 40 Wang X M, Shen Y P. The conservation laws and path-independent integrals with an application for linear electro-magneto-elastic media *Int J Solids & Structures*, 1996, 33 (6): 865~ 878
- 41 Chen C Q, Shen Y P, Tian X G. Variational principles of nonlinear piezothermoelastic media *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1998, 11 (1)
- 42 Chen C Q, Shen Y P, Wang X M. Exact solution of orthotropic cylindrical shell with piezoelectric layers under cylindrical bending *Int J Solids & Struct*, 1996, 33 (30): 4481~ 4491
- 43 Chen C Q, Shen Y P. Three dimensional analysis for the free vibration of finitely long orthotropic piezoelectric cylindrical shell *ASME J Vib & Acoust*, 1998, 120 (1): 194~ 198
- 44 高坚新, 沈亚鹏, 王子昆 有限元压电层合筒支板自由振动的三维精确解 力学学报, 1998, 30 (2): 168~ 177
- 45 Chen C Q, Shen Y P. Stability analysis of piezoelectric circular cylindrical shells *ASME J Applied Mechanics*, 1997, 64 (4): 847~ 852
- 46 Shen Y P, Chen C Q, Wang X M, Wang Z K, Zhang Y C. Mechanical properties analysis of piezoelectric smart structures *Key Engineering Materials*, 1998, 145~ 149: 1011~ 1020
- 47 Ren J T, Qiu Y. Vibration control of elastic linkage mechanisms using piezoelectric actuators/sensors In: Proc of Int Conference on Mechanical Transmissions and Mechanisms, 1997. 346~ 349
- 48 每纲, 沈亚鹏 光纤传感器和压电作动片在薄板振动控制中的应用 固体力学学报, 1997, 18 (3): 213~ 221
- 49 Yin L, Shen Y P. Strain sensing of composite plates subjected to low-velocity impact with distributed piezoelectric sensors: A mixed finite element approach. *Sound Vibration*, 1997, 199 (1): 17~ 31
- 50 Chen C Q, Shen Y P. Optimal control of active structures with piezoelectric modal sensors and actuators *Smart Materials and Struct*, 1997, 6 (2): 403~ 409
- 51 Zhao M H, Shen Y P, Liu Y J, Liu G N. Isolated crack in three-dimensional piezoelectric solid: Part I Solution by Hantel transform. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1997, 26: 129~ 139
- 52 Zhao M H, Shen Y P, Liu Y J, Liu G N. Isolated crack in three-dimensional piezoelectric solid: Part II Stress intensity factors for circular crack. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1997, 26: 141~ 149
- 53 赵明喙, 沈亚鹏, 刘国宁, 刘元杰 二维压电介质裂纹问题的边界积分方程解法 机械强度, 1998, 20 (2)
- 54 吕刚, 李俊宝, 陆峰, 张景绘 粘弹性阻尼器设计及其应用的实验研究 实验力学, 1998 (已录用)
- 55 李俊宝, 吕刚 智能桁架结构振动控制中压电主动构件的研究 (一) 和 (二). 压电与声光, (已录用)
- 56 Lu G, Zhang J H, Lu F, Li J B. Vibration measurement of viscoelastic composite truss and optimal placement of dampers In: Proceedings of 2nd Int Sym on Test and Measurement International Academic Publishers, Beijing, June, 1997
- 57 吕刚, 张景绘, 陆峰 结构的主、被动振动控制及其相互影响分析 振动工程学报, 1998, 11 (1)