

流固耦合力学概述*

邢景棠 周 盛 崔尔杰

北京航空航天大学, 北京 100083 北京空气动力学研究所, 北京 100074

提要 本文简要介绍了流固耦合力学及其特点、研究分支、一些进展及进一步发展的趋势

关键词 流固耦合; 气动弹性; 水动弹性; 非线性动力学; 计算力学

1 定义和特点

流固耦合力学是流体力学与固体力学交叉而生成的一门力学分支。顾名思义, 它是研究变形固体在流场作用下的各种行为以及固体位形对流场影响这二者交互作用的一门科学。流固耦合力学的重要特征是两相介质之间的交互作用 (fluid-solid interaction): 变形固体在流体载荷作用下会产生变形或运动, 而变形或运动又反过来影响流场, 从而改变流体载荷的分布和大小。正是这种相互作用将在不同条件下产生形形色色的流固耦合现象。

流固耦合问题可由其耦合方程来定义^[1]。这组方程的定义域同时有流体域与固体域, 而未知变量含有描述流体现象的变量及描述固体现象的变量, 一般而言, 具有以下两点特征:

- 流体域或固体域均不可能单独地求解;
- 无法显式地消去描述流体运动的独立变量或描述固体运动的独立变量

从总体上来看, 流固耦合问题按其耦合机理可分为两大类。第一大类问题的特征是两相域部分或全部重叠在一起, 难以明显地分开, 使描述物理现象的方程, 特别是本构方程需要针对具体的物理现象来建立, 其耦合效应通过描述问题的微分方程而体现。图1给出的渗流问题是这类问题的典型例子, 描述其现象的微分方程如下^[2]:

$$\begin{aligned} L^T \sigma + b - \rho \dot{u} &= 0 && \text{土壤骨架} \\ \sigma &= DL u \quad m p && \text{本构关系} \\ \nabla^T (k \nabla p) - \frac{n}{K} \dot{p} - m^T L u &= 0 && \text{渗流流体} \end{aligned}$$

* 本研究得到航空科学基金的资助。本文1995年在中国力学学会流固耦合力学专业委员会首届学术年会上宣读。

其中, ∇ 表示梯度算子, u 表示土壤骨架的位移矢量, p 为渗流压力, σ 是应力张量 (用矢量式), L 是相应于应变的微分算子, D 是弹性矩阵, b 是体力矢量, k 是渗透率, K_f 是流体的体积模量, n 是空隙率, $m = [1, 1, 1, 0, 0, 0]^T$. 这里, 由于耦合效应, 固体的本构关系中出现了压力项

第二大类问题的特征是耦合作用仅仅发生在两相交界面上, 在方程上耦合是由两相耦合面的平衡及协调关系引入的. 本文中, 我们主要讨论这一类问题

对于第二大类问题, Zienkiewicz 与其合作者 Bettess 在文 [3] 中按两相间相对运动的大小及相互作用性质将其分为三类. 图2中示出了这三类问题

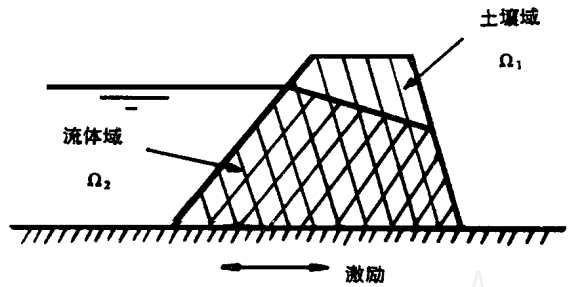


图1 土壤渗流相互作用

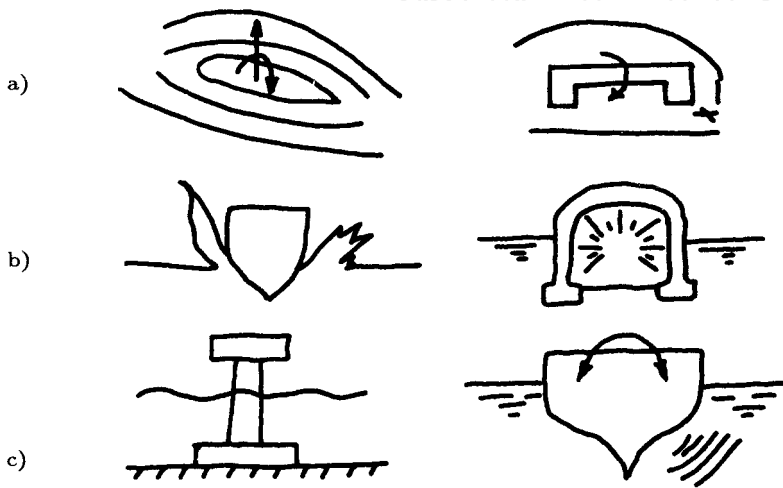


图2 三类流固耦合问题: a) 流固之间有大相对运动的问题; b) 有限流体运动的短期问题; c) 有限流体位移的长期问题

问题 a) 是流体与固体结构之间有大的相对运动的问题. 其典型例子是机翼颤振或悬桥振荡中发生的气固相互作用, 这被人们习惯称其为气动弹性力学问题. 在这类问题中的基本物理关系和物理过程可用易于理解的所谓方块图加以描述, 这种方法由著名力

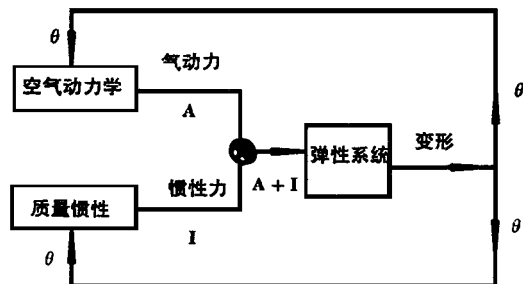


图3 机翼颤振的方块图

学家冯元桢 (Y. C. Fung) 教授^[4-5]引用到气动弹性力学中来, 特别是对于气动弹性稳定问题中的反馈过程, 用这种方法说明是很有启发性的。图3示出了机翼颤振的这一方框图。图中三个方框表示了机翼(结构)在这类问题中执行的三种不同功能: 首先它产生空气动力, 其次是产生惯性力, 再就是它产生弹性变形。机翼按空气动力学规律产生升力 A , 而机翼振动时则引起惯性力 I 。这两种力 $A + I$ 使弹性机翼产生变形 θ , 从而又产生新的作用力 A 和 I , 这样, 以反馈过程的形式构成一条闭合回路, 如果出现变形的振幅随时间不断增大的现象, 则称为颤振。

问题 b) 是具有流体有限位移的短期问题。这类问题由引起位形变化的流体中的爆炸或冲击引起。其特点是: 人们极其关心的相互作用是在瞬间完成的, 总位移是有限的, 但流体的压缩性是十分重要的。

问题 c) 是具有流体有限位移的长期问题, 如近海结构对波或地震的响应、噪声振动的响应、充液容器的液固耦合振动、船水响应等都是这类问题的典型例子。对这类问题, 人们主要关心的是耦合系统对外加动力载荷的动态响应。

图4中示出了流固耦合中各种力之间的相互影响关系。其中, 两个虚线描绘的大圆周分别划出了流体与固体。在这两个圆周相切的地方, 用一个小圆表示了两相耦合界面。通过耦合界面, 流体动力影响固体运动, 而固体的运动又影响流场。在耦合界面上, 流体动力及固体的运动事先都不知道, 只有在系统地求解了整个耦合系统后, 才可给出它们的解答, 这正是相互作用的特征所在。若没有这一特征, 其问题将失去耦合作用的性质。例如, 若给定流固交界面上的流体动力或交界面上固体结构的运动规律, 耦合机理将会消失, 原来的耦合系统将被解耦而成为单一固体在给定表面力下的动力问题及单一流体在给定边界条件下的流体力学边值或初边值问题。

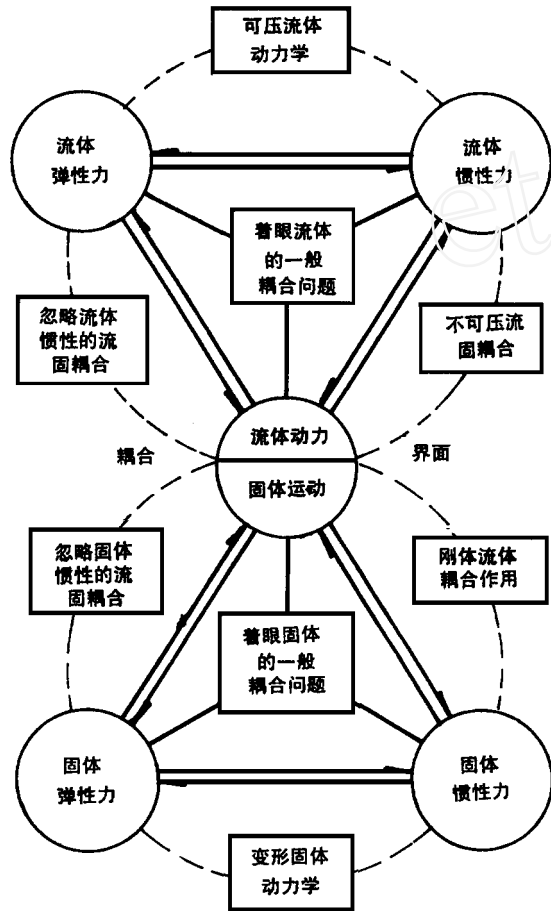


图4 流固耦合问题中各种力之间的相互关系图

若没有这一特征, 其问题将失去耦合作用的性质。例如, 若给定流固交界面上的流体动力或交界面上固体结构的运动规律, 耦合机理将会消失, 原来的耦合系统将被解耦而成为单一固体在给定表面力下的动力问题及单一流体在给定边界条件下的流体力学边值或初边值问题。

在最一般情况下, 流体与固体通过两相交界面的相互作用同时受流体及固体各自的弹性和惯性力影响, 这就是两个大圆周中间方框中表示的一般流固耦合问题。随着研究问题的目的不同, 可将着眼点放在流场或固体结构上进行研究。流体力学工作者多着眼于流场, 而固体力学工作者则注重结构。在工程实际问题中, 可针对不同性质的问题, 作相应的简化, 从而便有简化后的耦合问题。例如, 研究水同结构相互作用的非短期问题时, 水的可压性可以不计, 这就构成不可压流体同固体的耦合问题。类似地, 若忽略结构的弹性变形, 就有刚体同流体的相互作用问题。在航空中, 独成一个学科的刚体飞机飞行力学问题就是重要的例子。也可以在某些问题中忽略流体或固体的惯性效应, 从而有忽略流体惯性的耦合问题及忽略固体惯性的耦合问题。在空气弹性力学中的静力发散, 舵面效率等问题即是重要的忽略结构惯性的流固耦合问题。至于忽略流体惯性时的耦合问题, 其本质就是将流体(通常为气体)视为一弹簧, 如空气弹簧, 这在工程中也常常见到。所有这些简化后的耦合问题, 包括非耦合性质的可压流体动力学及变形固体动力学问题, 在图4中用虚线圆周上的方框表示出来。于是, 每种流固耦合问题可以按该问题中诸力所处的相互关系而进行直观的区别。

2 发展简史

流固耦合问题由于其交叉性质, 从学科上涉及流体力学、固体力学、动力学、计算力学等学科的知识; 从技术上与不同工程领域, 如土木、航空航天、船舶、动力、海洋、石化、机械、核动力、地震地质、生物工程等均有关系。其研究问题甚广, 难以确定合适的研究分类, 而且随着科学技术的发展, 其分类也在不停的变化, 这里以美国机械工程师学会(ASME)出版的权威力学文摘刊物《应用力学评论》(AMR)为例说明如下。

从1970年到1980年, AMR 的分类目录中没有流固耦合这一词条, 其有关文摘条目出现于气动弹性(aeroelasticity)、颤振(flutter)等子目中。

从1981年到1983年, AMR 的分类中出现了流体结构相互作用(fluid-structure interactions)的目录, 但并未在此目录下列出详细子目录。从全年统计来看, 这三年期间出现于流体结构相互作用条目下的文摘条数依次为49, 73和50条。

从1984年起, AMR 的分类目录中列出了固流相互作用(solid fluid interactions)的目录, 并在此目录下列出了细目。下面给出的细目, 取自《应用力学评论》1990年第12期^[6]:

166 SOLID FLUID INTERACTIONS

- A General theory
- B Nonlinear theory
- C External flow
- D Internal flow (Inc. Sloshing)
- E Vibration of structures in fluids
- F Interactions of waves with flexible structures
- G Multicomponent flow
- H Flexible tanks and containers

- I Pipes with flow ing fluids
- J Turbom achine blades excitation
- K Ocean structures
- L Control surface flutter of wings and tails
- M Panel flutter
- N Propeller and rotor flutter
- O Whole body vibration modes
- P Flutter control and suppression
- Q Static aeroelasticity (divergence)
- R Buffeting, gusts, turbulence effects
- S Aeroelastic effects on flight loads and stability
- T Aerothemoelasticity
- Y Computational techniques
- Z Experimental techniques

图5中给出了81—94年间每年收录于AMR 中有关固流相互作用文摘条数的统计曲线 在此线上, 84年有一大的跳跃上升, 84年后仍一直呈平均上升趋势

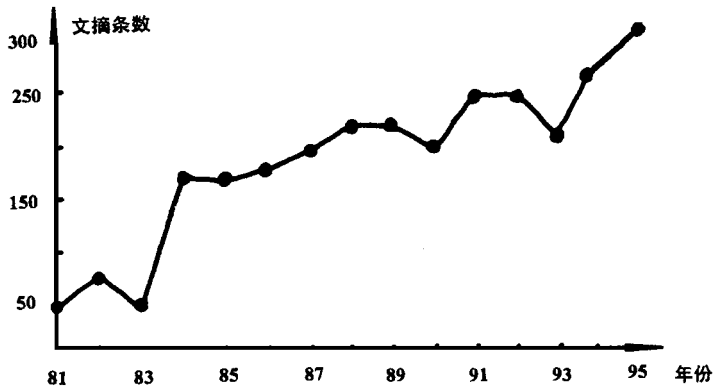


图5 美国ASME力学刊物AMR中有关固流相互作用文摘条数的统计曲线

上述AMR分类中有关流固耦合的子目分法仅供读者参考 这种分类有时并不能明显地反映出学科特点, 使读者一目了然的找出所关心的文献 例如工程中极其重要的流激振动及其控制等在AMR中多列入E类中 生物力学中血流同血管, 组织液同细胞组织等耦合问题多列入D类中 飞行器在水中坠落涉及的耦合问题放在D类中, 有时也列入其它类 此外, 在近代科学技术的发展中, 许多涉及物相变化、化学变化的两相耦合问题^[124], 例如, 宇宙飞行器在星际航行中接近周围有大气的星球时, 其环境发生剧烈变化, 强光、强热的影响、粒子侵蚀、表面烧蚀、催化等物理化学作用使结构的气动外形变化, 出现更为复杂的气固耦合问题; 高温、高热下液态金属的固化过程中, 或高速冲击、穿甲过程中同一物质液态、固态

同时共存,且区域不停变化,其整个过程的研究遇到的液固耦合问题等;以及有关流固耦合振动的利用问题,如旋转叶片的气弹自适应弯矩、气弹变形制动等并没有明显地列入类中。所有这些问题请从事流固耦合问题研究的同行在利用这一检索工具时注意,同时也不要使自己的研究受这一分类方法的束缚。

在《应用力学评论》的分类子目中,有三分之一多的子目与气动弹性问题有关,这说明了气动弹性研究的重要性。历史上,人们对流固耦合现象的早期认识正源于飞机工程中的气动弹性问题。据专著[4,5]记载,Wright兄弟和其它航空先驱者都曾遇到过气动弹性问题,但他们主要由直观上来解决问题,并未对真实的物理关系有所认识。1903年Langley的单翼机首次有动力的飞行试验时因机翼断裂而坠入Potomac河中。10年后,Brewer^[7]的研究指出这一事故是一典型的气动弹性静扭转发散问题。第一次世界大战初期,Handley Page轰炸机的尾翼颤振坠毁导致了Lanchester^[8]以及Bairstow与Fage^[9]进行了第一批有目的的气动弹性颤振研究。Theodorsen^[10]系统地建立了非定常气动力理论,为气动弹性不稳定及颤振机理的研究奠定了基础。直到1939年二战前夕,由于飞机工业的迅猛发展,大量出现的飞机气动弹性问题的需要,有一大批科学家和工程师投入这一问题的研究。从而,气动弹性力学开始发展成为一门独立的力学分支,并出现了一些在历史上有重要影响的专著及综述,如[11,12—16]。其中有重要贡献的科学家如Theodorsen^[10],Garrick^[17],Bisplinghoff^[12,13,16],Y.C.Fung^[4]以及将随机概念引入气动弹性的Liepmann^[18],Y.K.Lin^[19],Davenport^[20,21]等。在Bisplinghoff的综述文章^[16]中对有关开创性的工作作了仔细的评述。国内航空工业总公司著名飞机气动弹性力学专家冯仲越(已故)和一直从事飞机气动弹性力学研究的管德院士就是在我国较早致力于这一研究并为航空工业作出贡献的代表。在气动弹性的研究史上,发生过另一件划时代的事件,使气动弹性问题的重要性首次明显地表现于航空技术外的领域内。这就是1940年Tacoma悬桥在相当低的18米/秒风速下振动激励而倒塌^[13]。此后桥梁颤振问题得到了建筑师的高度重视。有关风对建筑结构影响的早期历史文献见[22,23]。

在土木工程中,一般认为Westergaard是研究坝水耦合的创始人^[25]。他在1933年发表了他的著名论文^[24],给出了刚性重力坝在水平地震载荷下的动水压力分布,其解至今仍为许多国家的坝工抗震设计规范所沿用。然而,由于Westergaard解中,假定了刚性坝并给出了地面运动的规律,因而其解本质上并未计及两相的耦合作用,只是求解了一个给定边界条件的流体动力问题。至于对这类问题,考虑耦合作用的研究可见美加利福尼亚大学Chopra的论文^[26]。与坝水耦合问题类似的一类液固耦合问题是水中柱体的耦联振动问题。对这类问题,国内以著名力学家郑哲敏院士为代表的许多专家作了不少的研究,如[27—29]。

流体引起管道振动的研究源于横垮阿拉伯输油管道振动分析的需要^[30]。Feodos'ev^[31],Housner^[32]及Nordson^[33]是早期研究简支直输液管道稳定性的学者。应用不同的方法,他们得到了相同的基本运动方程并得出有关稳定性的相同结论。至于悬臂输流直管的开创性研究,可见Benjamin^[34-35]及Gregory和Paidoussis的论文^[36-37]。又有记载,早在1939年Bourrieres^[38]就对悬臂输流管作了最早的著名研究,但由于计算工具的落后,他未能确定出不稳定的临界条件。有关流体引起管道振动的早期专著及综述文章可见[39—40],其中给出了各类问题的

详细历史评述 Blevins 的著名专著 [42] 已译成汉语, 对国内的研究有重要的影响

船水耦合动力学的早期研究, 考虑船是一刚性浮体, 探讨其由于船的刚体运动引起的扰动 Haskind^[45-46] 对这类问题作了深入理解的分析. 他应用 Green 定理构造了由于船的存在及运动引起的速度位, 并推导了点源 Green 函数的形式. 沿着 Haskind 的开创性工作, 人们开始致力于通过速度位表示的线性边界值问题的构造和求解, 考虑船舶的存在及运动对流场的影响, 进行船舶刚性摇荡运动与水相互作用的研究. 在 Mays^[47] 的博士论文及 Newman^[48] 的影响甚大的综述文章中对有关历史作了详细叙述, 并建立了船舶水动力学这类问题的统一理论. 至于考虑船体弹性变形的水动弹性理论的创始性工作应归功于 Bishop 和他的学生 Price, 他们在其专著 [49] 中对其研究及理论作了详述. 这一专著的出版对船水动力学的研究有深远的影响, 已被译成俄文.

储液容器的振荡问题的开创性研究归功于许多俄罗斯的专家. 在 Moiseev 的两篇著名综述报告 [50—51] 中, 详述了有关基本理论及文献. 由于当时计算工具的落后, Moiseev 的研究主要局限于刚性不动容器或作简单运动刚体 (如单摆) 中液体的振荡, 方程的导出应用了动力学的变分原理, 求解采用了一些近似方法, 如 Ritz 法. 对于弹性结构与液体的耦合振荡, 他指出这是一相当复杂的问题, 仅仅讨论了梁中有液体腔的扭转及弯曲振荡问题.

沉浸于液体中的结构对爆炸波的瞬态响应短期流固耦合问题似乎最早为 Taylor 于 1941 年所研究, 他在文 [52] 中讨论了水中无穷大平板对一维爆炸波的响应问题. Taylor 所讨论的问题虽然简单, 但他的开创性研究给出了一个重要的一般性研究方法, 这就是将总噪声速度位分解为入射、反射和辐射速度位. 另一种极为重要的短期问题是变形固体的着水撞击问题. 这一问题早期研究的开创性工作归功于 von Kármán, 他于 1929 年提出了入水理论, 在两相耦合面上引入基于试验结果的附加水质量, 分析研究了水机降落过程中的冲击现象^[53]. 1932 年 Wagner^[54] 对 von Kármán 的方法作了修正, 引入水波影响因子, 使结果更符合实际. von Kármán 和 Wagner 的方法虽没有对流场进行仔细分析, 但基于实验的假设使问题简单明了, 在一定程度上也能解释撞水现象的机理, 因而这一方法仍为工程设计的初期用于估算撞水力. 至于对这类问题的全场分析, 则是有限元、边界元方法充分发展后的成果.

3 现状与展望

如果将与飞机颤振密切相关的气动弹性研究作为流固耦合的第一次高潮的话, 则与风激振动及化工容器密切相关的研究可作为流固耦合研究的第二次高潮. 这次高潮起始于 1964 年美国 Alaska 地震及 1965 年英国 Ferrybridge 八座冷却塔中的三座在不太高的风速下被摧毁. 英国 Ferrybridge 的事故使 1940 年 Tacoma 事件兴起的风工程研究更为活跃, 因此, 许多文献上把气弹的非航空应用作为发展的一个重大里程. Alaska 地震引起许多石化容器在地震载荷下惨遭破坏, 使国民经济受到极大损失. 由于化工工业在现代工业中的地位, 促使一部分科技工作者对化工容器在地震载荷下的破坏进行分析, 以便避免其发生. 研究发现, 这些化工容器破坏多数是由动力屈曲引起, 而引起这种屈曲的翻转力矩是由地震时容器内部流体的晃

动产生的 这便引起了力学工作者对流固耦合问题的注意 1967年, 美国A S M E 应用力学部发起召开了第一次流固耦合研讨会^[55]。会议论文被分为空中爆炸及响应, 噪声相互作用问题, 气动弹性与水弹性四组共11篇汇入文集 由于当时计算技术及工具还不发达, 其论文研究集中于分析和试验技术 10年后, 1977年A S M E 应用力学部又召开了第二次有关流固耦合问题的研讨会^[56]。这次会议文集共9篇论文, 全部讨论有关流固耦合问题的计算方法 论文涉及的内流问题有充液结构内的爆炸分析、管道中的水锤效应、充液容器的晃动及毛细流中血细胞的变形; 而外流问题有沉浸结构的瞬态运动、流固相互冲击、板的颤振及流体引起的振动 文集编辑者在前言中明确指出: 流固耦合问题的处理常常遇到在其它应用力学领域很少碰到的困难, 如描述流体运动的欧氏系与描述固体运动的拉氏系之间的同时应用问题; 无穷域的外流问题需要采用非寻常的技术以提高计算效率等 文献 [57—79] 列出了A S M E 应用力学部从81年到92年冬季年会上有关流固耦合的会议文集 文献 [80—97] 列出了A S M E 压力容器及管道夏季会议上有关流固耦合方面的文集, 其中从1987年起出现了由流固耦合专业分会与地震工程分会联合召开的有关晃动、振动及各种流固耦合系统的地震响应等问题的会议文集, 如 [83, 85, 89, 90, 93, 95] 等 文献 [98—104] 列出一些涉及流固耦合的其它会议文集, 如第11、12届全美应用力学大会文集 [99, 100], 在英国、加拿大召开的会议文集 [102—104] 这些重要的系列性会议基本上反映了流固耦合研究的进展情况 以美国A S M E 1992年冬季会议文集为例说明如下 文集 [72] 中多数文章研究圆柱由于热交换引起支持附件松动的非线性流固耦合系统 编者认为, 问题的难点及不清楚之处仍处于1988年的水平, 直到流动同圆柱相互作用的细节过程彻底弄清之前, 这一问题将仍是一个有趣的研究课题 文集 [73] 虽仅列出14篇文章, 但来自美、英、俄、日、加拿大和澳大利亚六国, 从理论及实验两方面探讨声音与结构的相互作用 文集 [74] 中的文章多数涉及两相流动 文集 [75] 讨论涡流与结构的相互作用, 涉及混沌等问题 文集 [76] 中出现了动力系统问题的研究者同工程工作者相结合的研究趋势, 指出了动力系统的研究方法对流激振动的研究将提供一有力工具, 更好地洞察问题的本质 文集 [77] 多数文章讨论管道在热交换下的声音共振问题, 指出了预测其发生的方法等 文集 [78] 的多数文章涉及能源动力工业, 指出流体引起振动常出现在不受设计规范约束的非主要部件上, 往往被人们疏忽, 但一旦这些部件失效, 同样引起整个电厂停机 文集 [79] 涉及非圆截面流动、导线运动、振动悬挂等土木、机械工程中的问题, 反映了现代物理、分析、数值计算等学科方法在处理这类问题上的成果 再如美国A S M E 压力容器及管道年会文集 [84] 列出20篇文章, 来自4个国家, 是首次有中国学者出席的会议; 文集 [89] 中给出了自1964年美A laska 地震后25年来液箱晃动问题研究的进展

文献 [105—112, 131, 134, 197, 204] 列出了一些有代表性的综述报告 在这些综述文章中都给出了足够的参考文献, 是希望从事有关研究的研究生必读的重要材料 文献 [113—122] 给出了一些有名的专著, 书中给出了有关问题仔细的理论及应用描述

国内78年以来有关流固耦合问题研究的会议文章主要集中在不同学科召开的系列会议上 以第1次会议召开的时间先后为序, 第1个系列会议是气动弹性力学方面的会议, 首届会议78年于南宁召开, 此后航空系统的7210气弹专业会议共召开8次^[123]。第2个是“全国振动理

论及应用学术会议”，这一会议最早由中国力学学会、中国航空学会、中国宇航学会、中国机械工程学会四大学会主办，中国振动工程学会成立后发展为五大学会主办，会议从80年以来共召开5次^[126]。与这个系列会议密切相关的国内召开的国际会议已有3次^[127-129]。在这些会议中有关流固耦合方面的文章大多数是国内振动界固体力学、结构工程工作者完成的，基本上代表了国内固体、结构力学界在这一领域的研究情况。第3个国内系列会议是“流体弹性力学学术讨论会”。会议由中国力学学会、中国航空学会、中国水利学会、中国空气动力研究会主办。从85年以来共召开了4届会议^[130]。这一会议是国内唯一的专门讨论流体弹性的学术会议，但会议论文多数由流体力学工作者提供，代表了国内流体力学界在流固耦合领域研究的情况。第4个系列会议由土木工程学会、水利学会、航空学会、岩石力学与工程学会、振动工程学会联合发起，1993年6月在洛阳召开了第1次结构与介质相互作用学术会议，共有论文150多篇，分为ABCDE5类。其中D类为固体结构与流体介质相互作用，共列入论文23篇^[132]。国内首次气弹、水弹国际会议在1993年10月于北京召开，会议代表来自11个国家或地区，文集^[131]中列出了7个特邀报告，共约70篇学术论文，讨论了问题的进展及理论应用成果。此外，在我国召开的水工结构的国际地震与水坝会议(1987)、国际高坝水力学术会议(1988)、第7届A PD-IA HR会议(1990)上大量的报道了我国在该领域有关水-结构耦合的研究成果，其详细评述可见^[134]。在海洋工程结构的水弹性、建筑物和工业结构的风效应及流固耦合的基础理论研究方面，国内许多单位也进行了大量的工作^[136-138]。作为国家自然科学基金重大项目的课题总结文集^[135]详细地报道了国内在海洋工程领域所取得的重要成果。在航空院校应用多年的气弹教材^[195]等为航空工业培养了大量的气弹人才。

叶轮机气动弹性问题是流固耦合问题的一个重要分支。1976年在巴黎由UTAM召开了名为叶轮机气动弹性力学的国际学术会议，此后便形成了以这一名称召开的系列国际会议。1994年在日本福冈召开了第7届会议，第8届会议将于1997年在瑞典斯德哥尔摩召开。1984年我国代表被选入该系列会议的科学委员会，并于1989年在北京航空航天大学召开了第5届叶轮机气动弹性力学与非定常流动国际学术会议^[133]。有关文献^[140-142]等反映了国内在这方面的部分研究工作，文^[196]指出：“我国学者在该领域颇有建树，特别是初步解决了失速颤振这一国际性难题，受到国际学术界重视。”

1994年中国力学学会批准，成立了流固耦合力学专业分会，将国内流体、固体两方面从事这一研究的同志从组织上联系起来，这对学科的发展将起到极为重要的推动作用。

概括有关流固耦合问题的文献，可以发现其进展有以下主要特点。

1) 线化理论日趋完善、程序化，业已提供工程应用。由于流固耦合系统的复杂性，其求解主要立足于数值分析。起初人们自然想到的是用位移法结构分析的通用程序来求解耦合问题^[143]，不同的是只要将流体视为剪切刚度为零的固体即可。但实际计算发现，剪切刚度为零，计算中出现零能模式，方法无法推广应用。至于流体中采用压力、固体中采用位移的混合模式没有零能模态的困难，但其有限元方程中的系数矩阵是非对称的。早期，Iron^s^[144]提出了一对称化方法，要求描述流体惯性的矩阵可逆。然而，当考虑自由面线性波时，通常这一矩阵是奇异的，因而一些有名的通用程序中不得不忽略自由面波，这就限制了方法的应用。文

[145—149] 基于考虑自由面线性波的两个变分公式, 提出了混合型流固耦合分析有限元模型的3种新的对称化方法, 克服了文 [144] 方法应用的局限性。在这些理论进展的基础上结合文 [150] 的研究, 完成了可求解大量工程耦合问题的线性流固耦合动力分析程序 FSIA P92, 并用于工程实际分析。文 [151—152] 中讨论了应用速度位求解耦合振动的模型, 其方程系数阵是对称的, 但涉及复特征值问题的解法, 其方法有待进一步研究。在专著 [198] 中, 对线化理论下流固耦合问题的理论及有限元分析方法作了系统的论述。

在船水耦合分析的研究中, Bishop, Price 和吴有生院士^[153]将[49]中的思想作了推广, 给出了一般线性水上运动浮体的三维水弹性理论, 其程序化工作经文 [154] 的继续深入研究得以完善并用于船界。文 [155] 中附录A 给出了耦合分析中一个重要的物面条件。文 [156] 在探讨三维船波相互作用理论时对有关边界条件, 特别是无穷域内的远场辐射边界进行了仔细讨论, 指出当航速不为零时, 远场辐射条件的表述是十分复杂的。文 [157] 提出了一个新的单元, 考虑了吸收边界, 用以求解外无穷域问题, 但其效率等还有待工程实践中进一步检验。有关船结构水弹性方面进展的详细综述可见文 [197]。

2) 非线性耦合问题的研究取得了可喜的成果。在固体力学中非线性有限元分析的方法已相当成熟, 在流体力学中非线性纳维-斯托克斯方程求解的CFD 技术的进展也十分迅速, 但对于耦合问题, 遇到的最大困难就在于采用统一坐标系及两相界面的协调问题。众所周知, 固体力学中习惯采用Lagrange 坐标系, 着眼于质点, 而流体力学中更多地使用 Euler 坐标系, 着眼于空间点。这种运动描述方法上的差异, 对小运动问题, 可不加区分, 但对于大运动非线性问题情况则复杂了。两相界面的位形事先未知, 开始重合的节点随运动固体点移动, 流体点则不动, 如何协调界面点是非线性耦合问题比起单纯固体或流体非线性问题来所特有的难点。其次, 非线性耦合问题同其它耦合问题一样, 由于非线性, 叠加原理失效, 在动力分析中的振型叠加原理及水波分析中将总速度位分解为入射、绕射、辐射位之和的叠加解法原则上不再成立, 必须探讨全场求解途径。

为了解决不同坐标系的困难, 文 [158] 中提出的用于流场计算的ALE 方法被用于流固耦合分析^[159-164], 以处理界面协调及自由面的问题, 其中有的作者应用有限元方法, 有的作者采用边界元方法。ALE 坐标系可以任意速度在空间运动, 若其速度为零, 它即为 Euler 系; 若其速度等于质点速度, 它即为拉氏系, 因而ALE 系提供了两种坐标系的一种统一描述。

非线性流固耦合问题中极其重要的问题是充液容器内液体的大幅度晃动问题。对这一问题国内最早的研究见 [165]。文 [166] 中给出了一般力学界从充液卫星动力学方面计及微重力环境的研究情况, 开始的报道主要集中于刚体结构情形, 后来的研究向弹性结构方向发展。对耦合问题用边界元、或耦合有限元-边界元方面的研究见 [167—172, 194]。

3) 各种工程领域提出了越来越多的两相耦合问题, 使该领域的研究, 更加丰富多采。例如在航空工程中, 由于复合材料结构的应用, 促使颤振工作者研究复合材料层合板在超音速流、气动加热等环境下的颤振问题^[173-174]。在建筑工程中, 由于高层建筑的迅速发展, 房屋高度的增高使结构整体刚度下降, 加之楼群的密集布局等因素影响, 建筑结构同风的相互作用也引起了人们的重视^[175, 176, 201]。在石化、机械、核工业中, 人们最初探讨充液容器、输液管

道的耦合振动时,总是假设边界条件是理想简支或固支等。但实际问题中,因振动、加热等结构的固定元件常常出现松动、间隙等非线性因素,在这种环境下的耦合分析正在被人们研究,例见 [72, 177, 178, 202, 203]。在人体、生物工程中,血管流、眼球等的分析已开始从两相耦合力学的角度进行研究^[179-182]。在海洋工程中,Wiley 系列丛书介绍的许多研究课题^[199-200]与流固耦合密切相关。文 [124, 138] 从空气动力学角度提出了现代发展中值得研究的更为复杂的流固耦合问题。

4) 其它学科的理论成果及方法开始渗透到流固耦合问题的研究中,使其研究更加深入。这方面影响最大的要算系统动力学的理论及方法^[176]。Arnold 的名著^[188]建立了辛几何与 Hamilton 力学的关系,引起了数学家及力学家的极大关注^[189]。动力系统的场及几何结构为研究包含流固耦合在内的非线性系统的研究提供了有效的描述方法。有关耦合系统稳定性^[183-184]、分岔、混沌等问题的研究已出现在有关流固耦合的系列会议文集中。计算数学中,高速发展的并行算法为求解大型耦合系统方法及时空元求解提供了有力的工具。试验测量技术的成果使过去难以进行的非线性测量如大幅晃动及水中爆炸取得了初步结果^[185-187]。

展望从现在起到下世纪初这一段时间,流固耦合动力学如同其它力学分支一样,将仍然主要围绕非线性问题进行研究。这一研究将从理论、计算、实验及工程应用四方面全面开展。

理论方面的研究向流固耦合工作者,特别是跨世纪的年青科学工作者,提出了更高的要求,需要我们认真地学习和掌握经典动力学的近代数学方法^[188-192],将数学上的成果用于流固耦合系统的研究中,洞察并探讨问题的机理与本质,促进研究的进展。非线性问题研究的需要,出现了数学-力学又一次结合的热潮,在这种热潮推动下前进的力学工作者,必须不断地更新自己的知识结构,“不要停留在已有成果的安全岛上,大胆地冲向以前无人问津的领域”^[193]。

计算方面固体力学中非线性有限元分析技术已十分完善,流体力学中 CFD 方法的成果也十分惊人。尽管 ALE 技术提供了一有效的途径将固体中常用的拉氏系与流体中常用的欧拉系相联系,但要真正地将两者各自有效的方法相结合求解非线性耦合问题,其任务仍十分艰巨,需要流体力学工作者同固体力学工作者密切结合,协同作战。固体力学出身的流固耦合力学研究者,需要熟悉 CFD 的各种方法与细节,如动态网格控制,无结构网格等。反过来流体力学出身的流固耦合力学研究者也需要深入了解固体结构分析中的处理方法,这是耦合分析的特点向从事该领域研究的工作者提出的更高要求。

非线性问题中,叠加原理失效,模态叠加法原则上不可再用,必须探讨全场求解耦合方程的途径,这就使求解方程的规模加大,有关并行算法的成果将会在耦合问题的求解中发挥更大的作用。

实验研究在流固耦合力学中起着十分重要的作用,众所周知的风洞试验为气动弹性研究奠定了坚实的基础。涉及到非线性问题的实验其难度更大,例如,与化工容器地震载荷下晃动有关的实验中,考虑其螺栓松动、间隙等因素将给测量带来了很大麻烦。非线性问题中出现的分岔、混沌、突变现象等的实验室再现都是十分棘手的问题。而这些试验结果、现象观

察又恰是非线性模型建立的事实基础, 这些关键的实验问题, 须要实验工作者付出艰苦的劳动去研究

应用研究有两方面的内容: 其一是将已有的成果如计算程序、方法等实用化 对于国内的软件, 尤其要在前后处理上下功夫, 使其方便、直观地用于解决工程问题 其二是要不断地深入工程中各个领域, 研究和解决工程中提出的各种流固耦合问题 如前面提到的生物工程中的血管流问题、建筑工程中提出的高层结构同风的相互作用、冶金铸造工业中的金属固化过程; 国内正在规划研究的航天高技术、海洋工程和海上高速运输系统、高速列车、三峡工程等重大项目中遇到的新的流固耦合问题 通过应用研究, 将已有的科研成果转化为生产力, 促进国民经济的发展; 同时, 在应用中进一步完善并建立新的数学模型, 将流固耦合理论研究提高到一个更高的水平

致谢 笔者向清华大学杜庆华、郑兆昌、张楚汉教授, 无锡船舶科学研究所吴有生院士, 华中理工大学黄玉盈教授, 上海交通大学陆鑫森教授, 武汉大学冯振兴教授, 中科院力学所欧阳怡研究员以及留英博士吴用舒、谭明一等表示感谢, 没有他们的指导与无偿地提供许多宝贵资料, 这一综述是难以顺利完成的

参 考 文 献

- 1 Zienkiewicz O C. Coupled problems and their numerical solution in: Lewis R W, Bettess P, Hinton E eds. Numerical Methods in Coupled Systems. John Wiley and Sons Ltd, New York (1984)
- 2 Zienkiewicz O C, Chang C T, Bettess P. Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils. Limits of validity. *Geotechnique*, **30** (1980): 385—395
- 3 Zienkiewicz O C, Bettess P. Fluid-structure dynamic interaction and wave forces, an introduction to numerical treatment. *Int. J. Num. Meth. Engrg.*, **13**, 1 (1978): 1—16
- 4 Fung Y C. An Introduction to the Theory of Aeroelasticity. J. Wiley and Sons, Inc., New York (1955). 中译本: 管德、冯仲越译, 空气弹性力学引论. 国防工业出版社, 北京 (1963)
- 5 Forsching H W. Grundlagen der Aeroelastik. Springer-Verlag, Berlin (1974). 中译本: 沈克扬, 译, 管德, 校. 气动弹性力学原理. 上海科技文献出版社, 上海 (1982)
- 6 *Applied Mechanics Reviews*, **43**, 12, Part 2 (1990): 371
- 7 Brewer G. The collapse of monoplane wings. *Flight* (1913)
- 8 Lanchester F W. Torsional vibration of the tail of an airplane. *ARC R. and M.* **276**, part 1 (1916)
- 9 Baird L, Page A. Oscillations of the tailplane and body of an aeroplane in flight. *ARC R. and M.* **276**, part 2 (1916). In: Technical Report of the Advisory Committee for Aerodynamics, for the year 1916—1917. II, His Majesty's Stationary Office, London (1920): 461—467
- 10 Theodorsen T. General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter. *NACA TR 496* (1934). In: Twentieth Annual Report of the National Advisory Committee for Aerodynamics 1934, U S Government Printing Office, Washington (1935): 413—433
- 11 Amann O H, Von Kaman T H, Woodruff G B. The Failure of the Tacoma Narrows Bridge, A Report to the Administrator, Federal Works Agency, March 28 (1941)
- 12 Bispilinghoff R L, Ashley H, Halfin R L. Aeroelasticity. Addison-Wesley Publ. Comp. Inc. Reading, Mass (1957)
- 13 Bispilinghoff R L, Ashley H. Principles of Aeroelasticity. J. Wiley and Sons, Inc., New York (1962)

- 14 Duncan W J. Control and Stability of Aircraft Cambridge University Press, Cambridge (1952)
- 15 Templeton H. A review of the present position on flutter. *AGARD Rep.* **57** (1956)
- 16 Bisplinghoff R L. Aeroelasticity. *Appl Mech. Rev.* **11** (1958): 99—103
- 17 Garrick I E. Aeroelasticity-frontiers and beyond, 13th Von Kaman lecture. *J. of Aircraft*, **13**, 9 (1976): 641—657
- 18 Liepmann H W. On the application of statistical concepts to the buffeting problem. *J. Aera Sci*, **19**, 2 (1952): 793—800, 822
- 19 Lin Y K. Probabilistic Theory of Structural Dynamics McGraw-Hill (1967)
- 20 Davenport A C. The application of statistical concepts to the wind loading of structures. *Proc Inst Civil Engs*, **19** (1961): 499
- 21 Davenport A C. Buffeting of a suspension bridge by storm winds. *J. Struct Dir. Am. Soc Civil Engs*, **88** (1962): 233
- 22 Johns D J, Scruton C, Ballantyne A M eds. Proceedings of a Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures vol I u. II, Loughborough (1968)
- 23 Wind Effects on Buildings and Structures vol I u. II, Her Majesty's Stationary Office, London (1965)
- 24 Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes. *Trans Amer. Soc. Civ. Eng.*, **98** (1933): 418—433
- 25 居荣初, 曾心传编著. 弹性结构与液体的耦联振动理论. 地震出版社, 北京 (1983)
- 26 Chopra A K. Earthquake Response of Concrete Gravity Dams AD 709640, California University, Berkeley (1970)
- 27 居荣初, 黄振平, 杜瑞明. 水中圆柱体结构的自由振动. 地震工程研究报告集, 第一集, 科学出版社, 北京 (1962)
- 28 王前信, 王考信. 伸臂梁在一侧有水时的自振特性与地震荷载. 地震工程研究报告集, 第一集, 科学出版社, 北京 (1962)
- 29 郑哲敏, 马宗魁. 悬臂梁在一侧受有液体时的自由振动. 力学学报, **3**, 2 (1959): 111—119
- 30 Ashley H, Haviland G. Bending vibrations of a pipe line containing flowing fluid. *J. Appl Mech*, **17** (1950): 229—232
- 31 Feodos'ev V P. Vibrations and stability of a pipe when liquid flows through it. *Inzhenernyi Sbornik*, **10** (1951): 169—170
- 32 Housner G W. Bending vibrations of a pipe line containing flowing fluid. *J. Appl Mech*, **19** (1952): 205—208
- 33 Nordström F I. Vibrations of a cylindrical tube containing flowing fluid. *Kungliga Tekniska Högskolans Handlingar (Stockholm)*, **73** (1953)
- 34 Benjamin T B. Dynamics of a system of articulated pipes conveying fluid, I Theory. *Proc. R. Soc., London A*, **261** (1961): 457—486
- 35 Benjamin T B. Dynamics of a system of articulated pipes conveying fluid, II Experiments. *Proc. R. Soc. London A*, **261** (1961): 487—499
- 36 Gregory R W, Paidoussis M P. Unstable oscillation of tubular cantilevers conveying fluid, I Theory. *Proc. R. Soc. London A*, **293** (1966): 512—527
- 37 Gregory R W, Paidoussis M P. Unstable oscillation of tubular cantilevers conveying fluid, II Experiments. *Proc. R. Soc. London A*, **293** (1966): 528—542
- 38 Bourrieres F J. Sur un Phenomene D'oscillation Autoentretene en Mechanique des Fluides Reels. *Publications Scientifiques et Techniques du Ministere de l'Air* 147 (1939)
- 39 Paidoussis M P. Flow-induced vibrations in nuclear reactors and heat exchangers, practical experiences and state of knowledge. In: Naudascher E et al eds. *Practical Experiences with Flow-induced Vibrations*. Springer-Verlag (1980): 1—81
- 40 Chen S S. Parallel flow-induced vibrations and instabilities of cylindrical structures. *Shock and Vibration Digest*, **6**, 10 (1974): 2—12
- 41 Chen S S. Flow-induced vibration of circular cylindrical structures, Part II: Cross-flow considerations. *Shock and Vibration Digest*, **9**, 11 (1977): 21—27

- 42 Blevins R D. Flow-induced Vibration. Van Nostrand-Reinhold, New York (1977). 中译本: 吴恕三、王觉等译 流体诱发振动 机械工业出版社, 北京 (1983)
- 43 Paidoussis M P. Fluidelastic vibration of cylinder arrays in axial and cross flow: state of the art *J. Sound Vib* **76** (1981): 36—60
- 44 Paidoussis M P. A review of flow-induced vibrations in reactors and reactor components *Nucl Eng. Des.* **74** (1983): 36—60
- 45 Haskind M D. The hydrodynamic theory of ship oscillations in rolling and pitching *Prikl Mat Mekh* **10** (1946): 33—66 (Engl Transl: *Tech Res Bull*, 1—12 (1953): 3—43, Soc Nav. Arch Mar Eng, New York)
- 46 Haskind M D. The oscillation of a ship in still water. *Izv. Akad. Nauk SSSR., Otd. Tekh. Nauk* **1** (1946): 23—34 (Engl Transl: *Tech Res Bull* 1—12 (1953): 45—60, Soc Nav. Archit Mar Eng, New York)
- 47 Mays J H. Wave Radiation and Diffraction by a Floating Slender Body. Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts (1978)
- 48 Newman J N. The theory of ship motions *Advances in Applied Mechanics* **18** (1978): 221—283
- 49 Bishop R E D, Price W G. Hydroelasticity of Ships, Camb. Univ. Press, Cambridge (1979)
- 50 Moiseev N N. Introduction to the theory of oscillations of liquid-containing bodies *Advances in Applied Mechanics*, **8** (1964): 233—289
- 51 Moiseev N N, Petrov A A. The calculation of free oscillation of a liquid in a motionless container. *Advances in Applied Mechanics*, **9** (1964): 91—154
- 52 Taylor G I. The pressure and impulse of submarine explosion waves on plates. In: Batchelor G K ed. *The Scientific Papers of G. I. Taylor*, Vol. 2. Cambridge University Press, Cambridge (1963)
- 53 Von Kaman T. The impact on seaplane floats during landing. NACA TN-321, National Advisory Committee for Aeronautics (1929)
- 54 Wagner H. Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces. NACA Translations No. 1366, National Advisory Committee for Aeronautics (1932)
- 55 Greenspon J E ed. Fluid-Solid Interaction, the Winter Annual Meeting of the ASME, Nov. 1967, Pittsburgh, Pennsylvania, ASME, New York (1967)
- 56 Belytschko T, Geers T L eds. Computational Methods for Fluid-structure Interaction Problems, the Winter Annual Meeting of ASME, Atlanta, Georgia, Nov. 27-Dec. 2, 1977. ASME, New York (1977)
- 57 Thompson W E ed. Fluid/Structure Interaction in Turbomachinery, the Winter Annual Meeting of ASME, Nov. 15-20, 1981, Washon, D. C., ASME, New York (1981)
- 58 Paidoussis M P, Griffin O M, Sevik M eds. Excitation and Vibration of Bluff Bodies in Cross Flow. Symposium on Flow-induced Vibration, Vol. 1, ASME meeting, Dec. 1984, New Orleans LA, ASME, New York (1984)
- 59 Paidoussis M P, Au-Yang M K, Chen S S eds. Vibration Arrays of Cylinders in Cross Flow, Symposium on flow-induced vibration. Vol. 2, ASME meeting, Dec. 1984, New Orleans LA, ASME, New York (1984)
- 60 Paidoussis M P, Chenoweth J M, Bernstein M D eds. Vibration in Heat Exchangers. Symposium on Flow-induced Vibration. Vol. 3, ASME meeting, Dec. 1984, New Orleans LA, ASME, New York (1984)
- 61 Paidoussis M P, Kalinowski A J eds. Turbulence-induced Noise and Vibration of Rigid and Compliant Surfaces, Symposium on flow-induced vibration. Vol. 5, ASME meeting, Dec. 1984, New Orleans LA, ASME, New York (1984)
- 62 Paidoussis M P, Chen S S eds. Computational Aspects of Flow-induced Vibration, Symposium on Flow-induced Vibration, Vol. 6, ASME meeting, Dec. 1984, New Orleans LA, ASME, New York (1984)
- 63 Paidoussis M P, Griffin O M, Dalton C eds. Flow-induced Vibration in Cylindrical Structures: Solitary Cylinders and Arrays in Cross-flow, Vol. 1, Winter Annual Meeting of ASME, Nov. —Dec. 1988, Chicago IL, ASME, New York (1988)
- 64 Paidoussis M P, Wambsgann M W, Steinger D A eds. Flow-induced Vibration of Cylinder Arrays in Cross-flow, Vol. 2, Winter Annual Meeting of ASME, Nov. —Dec. 1988, Chicago IL, ASME, New York (1988)

- 65 Paidoussis M P, Chen S S, Bernstein M D eds Flow-induced Vibration and Noise in Cylinder Arrays, Vol 3, Winter Annual Meeting of ASME, Nov. —Dec 1988, Chicago IL, ASME, New York (1988)
- 66 Paidoussis M P, Au-Yang M K, Chen S S eds Flow-induced Vibration due to Internal and Annular Flows and Special Topics in Fluidelasticity, Vol 4, Winter Annual Meeting of ASME, Nov. —Dec 1988, Chicago IL, ASME, New York (1988)
- 67 Paidoussis M P, Chenoweth J W, Chen S S, Stenner J R eds Flow-induced Vibration in Heat-transfer Equipment, Vol 5, Winter Annual Meeting of ASME, Nov. —Dec 1988, Chicago IL, ASME, New York (1988)
- 68 Keith W L, Uram E M, Kalinowski A J eds Acoustic Phenomena and Interaction in Shear Flows over Compliant and Vibrating Surfaces, Vol 6, Winter Annual Meeting of ASME, Nov. —Dec 1988, Chicago IL, ASME, New York (1988)
- 69 Reischman M M, Paidoussis M P, Hansen R J eds Nonlinear Interaction Effects and Chaotic Motions, Vol 7, Winter Annual Meeting of ASME, Nov. —Dec 1988, Chicago IL, ASME, New York (1988)
- 70 Dodge F T, Moody F J eds Fluid Transients in Fluid-structure Interaction-1989, ASME Winter Annual Meeting, Dec 1989, San Francisco CA, ASME, New York (1989)
- 71 Moody F J, Wiggert D C eds Fluid Transients and Fluid-structure Interaction-1991, ASME Winter Annual Meeting, Dec 1991, Atlanta, GA., ASME, New York (1991)
- 72 Paidoussis M P, Chen S S, Steinger D A eds Cross-Flow Induced Vibration of Cylinder Arrays-Proceedings, ASME Winter Annual Meeting, Nov. 1992, Anaheim, CA., ASME, New York (1992)
- 73 Farabee T M, Paidoussis M P eds Flow-structure and Flow-sound Interactions-Proceedings, ASME Winter Annual Meeting, Nov. 1992, Anaheim, CA., ASME, New York (1992)
- 74 Paidoussis M P, Bryan W J, Stenner J R, Steinger D A eds FSI/FW in Cylinder Arrays in Cross-flow-Proceedings, ASME Winter Annual Meeting, Nov. 1992, Anaheim, CA., ASME, New York (1992)
- 75 Paidoussis M P, Akylas T, Abraham P B eds Fundamental Aspects of Fluid-structure Interactions-Proceedings, ASME Winter Annual Meeting, Nov. 1992, Anaheim, CA., ASME, New York (1992)
- 76 Paidoussis M P, Namachchivaya N S eds Stability and Control of Pipes Conveying Fluid-Proceedings, ASME Winter Annual Meeting, Nov. 1992, Anaheim, CA., ASME, New York (1992)
- 77 Paidoussis M P, Sandifer J B eds Acoustical Effects in FSI-Proceedings, ASME Winter Annual Meeting, Nov. 1992, Anaheim, CA., ASME, New York (1992)
- 78 Paidoussis M P, Au-Yang M K eds Axial and Annular Flow-induced Vibrations and Instabilities-Proceedings, ASME Winter Annual Meeting, Nov. 1992, Anaheim, CA., ASME, New York (1992)
- 79 Paidoussis M P, Dalton C, Weaver D S eds Bluff-body/Fluid and Hydraulic Machine Interactions-Proceedings, ASME Winter Annual Meeting, Nov. 1992, Anaheim, CA., ASME, New York (1992)
- 80 Everstine G C, Au-Yang M K eds Advances in Fluid-structure Interaction 1984, ASME PVP Conf., June 1984, San Antonio TX, ASME, New York (1984)
- 81 Ma D C, Moody F J et al eds. Fluid-structure Dynamics, ASME PVP Conf. and Exhibition, June 1985, New Orleans LA, ASME, New York (1985)
- 82 Chen S S, Simonis J C, Shin Y S eds Flow-induced Vibration 1986, ASME PVP Conf. and Exhibition, Jul 1986, Chicago IL, ASME, New York (1986)
- 83 Ma D C, Su T C eds Fluid-structure Vibration and Liquid Sloshing, ASME PVP Conf., June—July 1987, San Diego CA, ASME, New York (1987)
- 84 Au-Yang M K, Chen S S eds Flow-induced Vibration-1987, ASME PVP Conf., June—July 1987, San Diego CA, ASME, New York (1987)
- 85 Ma D C, Chen S S eds Sloshing, Vibration and Seismic Response of Fluid-structure Systems, ASME PVP Conf., Jun 1988, Pittsburgh, PA, ASME, New York (1988)
- 86 Shin Y S, Kim K S eds Shock and Wave Propagation, ASME PVP Conf., Jun 1988, Pittsburgh, PA, ASME, New York (1988)

York (1988)

- 87 Au-Yang M K, Chen S S, Kaneko S, Chilukuri R eds Flow-induced Vibration-1989, ASME PVP Conf -JSM E Co-sponsorship, Jul 1989, Honolulu HI, ASME, New York (1989)
- 88 Shin Y S, Wang C Y, Colton J D, Kulak R F eds Shock and Wave Propagation, Fluid-structure Interaction and Structural Response, ASME PVP Conf -JSM E Co-sponsorship, Jul 1989, Honolulu HI, ASME, New York (1989)
- 89 Ma D C, Tani J, Chen S S, Lin W K eds Sloshing and Fluid Structure Vibration-1989, ASME PVP Conf -JSM E Co-sponsorship, Jul 1989, Honolulu HI, ASME, New York (1989)
- 90 Ma D C, Tani J, Chen S S eds Fluid-structure Vibration and Sloshing-1990, ASME PVP Conf, June 1990, Nashville TN, ASME, New York (1990)
- 91 Chen S S, Fujita K, Au-Yang M K eds Fluid-induced Vibration-1990, ASME PVP Conf, June 1990, Nashville TN, ASME, New York (1990)
- 92 Au-Yang M K, Hara F eds Flow-induced Vibration and Wear 1991, ASME PVP Conf, June 1991, San Diego, CA, ASME, New York (1991)
- 93 Ma D C, Tani J, Fujita K, Lin C W eds Fluid-structure Vibration and Sloshing 1991, ASME PVP Conf, June 1991, San Diego, CA, ASME, New York (1991)
- 94 Wang C Y, Moody F J, Shin Y W eds Fluid-structure Interaction, Transient Thermal-hydraulics, and Structural Mechanics-1992, ASME PVP Conf, June 1992, New Orleans LA, ASME, New York (1992)
- 95 Ma D C, Fujita K, Tani J eds Fluid-structure Vibration and Sloshing-1992, ASME PVP Conf, June 1992, New Orleans LA, ASME, New York (1992)
- 96 Wang C Y ed Fluid-structure Interaction, Transient Thermal-hydraulics, and Structural Mechanics-1993, ASME, New York (1993)
- 97 Au-Yang M K, Ma D C eds Fluid-induced Vibration and Fluid-structure Interaction-1993, ASME, New York (1993)
- 98 Dowell E H, Au-Yang M K eds Fluid Structure Interaction and Aerodynamic Damping, the Vibration and Sound Conf, Sep. 1985, Cincinnati, OH, ASME, New York (1985)
- 99 Chen C F ed Mechanics USA 1990, Proc of Eleventh US National Congress of Applied Mechanics, May 1990, Tucson, Arizona, ASME, New York (1990)
- 100 Kobayashi A S ed Mechanics USA 1994, Proc of the 12th US National Congress of Applied Mechanics, June 1994, Seattle, Washington, *Applied Mechanics Reviews*, **47**, 6, part 2 (1994)
- 101 BHRA Fluid Engineering, International Conference on Flow-induced Vibrations in Fluid Engineering, September 14—16, (1982) Reading, England
- 102 King R ed Flow-induced Vibrations, Proc of the First International Conf, May 1987. Bownes-on-Windemere, UK, Springer-Verlag, London (1987)
- 103 Price W G, Temarel P, Keane A J eds Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, Proc Conf, June 1990 Uxbridge U. K., Elsevier (1991)
- 104 Chakrabarti S K et al eds Offshore Mechanics and Arctic Engineering-1992, Proc Conf, June 1992, Calgary, Alberta, Canada, ASME, New York (1992)
- 105 Au-Yang M K, Galford J E Fluid-structure interaction—a survey with emphasis on its application to nuclear steam system design. *Nuclear Engineering Design*, **70**, 3 (1982): 387—399
- 106 Chakrabarti S K Recent advances in high-frequency wave forces on fixed structures. *J. Energy Resources Tech*, **107**, 3 (1985): 315—328
- 107 Johnson W. Recent developments in the dynamics of advanced rotor systems. *Vertica*, **10**, 1 (1986): 73—107
- 108 Paidoussis M P. Flow-induced instabilities of cylindrical structures. *Appl Mech Rev*, **40**, 2 (1987): 163—175
- 109 Rammerstorfer F G, Scharf K, Fisher F D. Storage tanks under earthquake loading. *Appl Mech Rev*, **43**, 11 (1990): 261—282
- 110 Shimizu N. Advances and trends in seismic design of cylindrical liquid storage tanks. *JSM E Int J*, **33**, 2 (1990): 111—

- 111 Bismarck-Nasr M N. Finite element analysis of aeroelasticity of plates and shells *Appl Mech Rev.*, **45**, 12 (1992): 461—482
- 112 Tang D M, Dowell E H. Theoretical and experimental study on nonlinear response of a rotor blade to a gust *Appl Mech Rev.*, **46**, 12 (1993): s3—s11
- 113 Newman J N. Marine Hydrodynamics 7th printing, The Massachusetts Institute of Technology, USA (1992)
- 114 Blake W K. Mechanics of Flow-induced Sound and Vibration Vol 1—2, Academic, Orlando (1986)
- 115 Chen S S. Flow-induced Vibration of Circular Cylindrical Structures Hemisphere Publishing Corporation, New York (1987)
- 116 Brebbia C. Coupled systems In: Kardestuncer H et al eds Finite Element Handbook McGRAW-HILL, New York (1987): 3 285—3 319
- 117 Zukauskas A, Ulinas R, Katinas V, Karni J. Fluid Dynamics and Flow-induced Vibrations of Tube Banks Hemisphere Publishing Corporation, New York (1988)
- 118 Gibert R J. Vibration des Structures: Interactions avec les Fluides—sources D'excitation Aleatoires Eyrolles, Paris (1988)
- 119 Lukovskii A A, Trocenko V A. Interaction of Thin-walled Elastic Elements with Fluid in Moving Cavities, (in Russian). Naukova Dumka, Kiev (1989)
- 120 Blevins R D. Flow-induced Vibration Van Nostrand Reinhold, New York (1990)
- 121 Naudascher E, Rockwell D. Flow-induced Vibrations: an Engineering Guide Balkema, Rotterdam, Netherlands (1994)
- 122 Lewis R W, Bettess P, Hinton E. Numerical Methods in Coupled Systems John Wiley and sons, Chichester (1984)
- 123 国防科工委7210办公室气动弹性专业组编, 气动弹性工作十年 (1979—1989). (1990)
- 124 崔尔杰, 现代空气动力学发展中几项重要的基础性研究课题 中国力学学会扩大理事会上的报告 (1994)
- 125 Dowell E H, Curtiss H C, Scanlan R H, Sisto F A. Modern Course in Aeroelasticity. Kluwer Academic Publishers (1978)
- 126 全国振动理论及应用学术会议文集 昆明 (1981), 西安 (1984), 哈尔滨 (1987), 郑州 (1990), 屯溪 (1993)
- 127 Du Qinghua ed Proceedings of the International Conference on Vibration Problems in Engineering June 19—22 (1986), Xian, China, XianJiatong University Press, Xian (1986)
- 128 Du Qinghua ed Proceedings of the International Conference on Vibration Problems in Engineering Vol 1—2, June 17—24 (1990), Wuhan-Chongqing, International Academic Publishers, Beijing (1990)
- 129 Zheng Z C ed Proceedings of the International Conference on Vibration Engineering June 15—18 (1994), Beijing, China, International Academic Publishers, Beijing (1994)
- 130 全国流体弹性力学学术讨论会文集 桂林 (1985), 北京 (1986), 北航学报, 4 (1986), 安徽 (1990), 苏州 (1992)
- 131 Cui E J ed Proceedings of International Aero-hydroelasticity, Developments and Applications Conference on aero-hydroelasticity CAHE'93, July 27—30 (1993), Beijing, China, Seismological Press, Beijing (1993)
- 132 曹志远主编 结构与介质相互作用理论及其应用 河海大学出版社, 南京 (1993)
- 133 Proceeding of the 5th International Symposium on the Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachinery and Propellers Sep. 18—21, 1989, Beijing, Pergamon Press (1989)
- 134 Li Guifen, Xie Shenzong, Lin Qinghua. Research on hydroelastic vibration on hydraulic structures in China In: [131]
- 135 海洋工程中的力学问题 (课题总结论文选集). 国家自然科学基金重大项目 (1991)
- 136 项海帆 大跨度桥梁的抖振分析及控制 第4届全国风工程及工业空气动力学学术会议论文集 (1994): 13—24
- 137 Sun T F et al Interference between wind loading on group of structure (invited paper), In: Proc APSOWE III, Hong Kong (1993)
- 138 崔尔杰 流体-弹性耦合的流体动力学问题 第3届全国流体力学学术会议论文集, 科学出版社, 北京 (1988)
- 139 陆鑫森 海洋工程大体积结构的流固耦合问题 上交大技术资料, No. 82355 (1982)

- 140 周盛等著 叶轮机气动弹性力学引论 国防工业出版社, 北京 (1989)
- 141 周盛, 顾高墀, 潘杰元, 李其汉 航空螺旋桨与桨扇 国防工业出版社, 北京 (1994)
- 142 杨晓东, 陶德平, 周盛, 关于叶轮机气动弹性力学一个基本假设的讨论 中国科学 (A 辑) (1991): 192—199
- 143 Akkas N, Akay H Y, Yilmaz C. Applicability of general-purpose finite element programs in solid-fluid interaction problems *Computer Structures*, **10** (1979): 773—783
- 144 Irons B M. Role of part-inversion in fluid-structure problems with mixed variables *AIAA J.*, **8** (1970): 568
- 145 邢京堂 考虑自由面线性波的流固耦合动力分析的两个变分公式 航空学报, **9**, 11 (1988): A 568—A 571
- 146 Xing J T, Price W G. A mixed finite element method for the dynamic analysis of coupled fluid-solid interaction problems *Proc. R. Soc. Lond. A* **433** (1991): 331—344
- 147 Xing J T, Price W G, Du Q H. Mixed finite element substructure-subdomain methods for the dynamical analysis of coupled fluid-solid interaction problems *Trans. R. Soc. Lond. A* **354** (1995): 259—295
- 148 邢京堂 线性流固耦合动力分析程序 FSIA P92 简介 航空学报, **13**, 9 (1992): A 548—551
- 149 邢景棠编著 流固耦合振动分析程序 FSIA P92 理论手册/用户手册 北京航空航天大学固体力学研究所 (1991)
- 150 邢京堂, 郑兆昌 基于弹性动力学变分原理的模态综合法研究 固体力学学报, **2** (1983): 248—257
- 151 戴大农, 王勳成, 杜庆华 流固耦合系统动力响应的模态分析理论 固体力学学报, **11**, 4 (1990): 305—312
- 152 Everstine G C. A symmetric potential formulation for fluid-structure interaction. *J. Sound Vib.*, **79**, 1 (1981): 157—160
- 153 Bishop R E D, Price W G, Wu Y. General linear hydroelasticity theory of floating structures moving in a seaway. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **316** (1985): 375—426
- 154 Wu Yongshu Hydroelastic Analysis of Non-beam like Ships in Waves Ph. D. thesis, Dept of Mech Eng, Brunel Univ, U. K. (1990)
- 155 夏锦祝 细长浮体的水弹性力学理论 工学博士论文, 中国船舶科学研究中心 (1994)
- 156 Newman J N. The quest for a three-dimensional theory of ship-wave interactions *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **334** (1991): 213—227
- 157 Kallivokas L F, Bielak J. Element for the analysis of transient exterior fluid-structure interaction problems using the FEM. *Finite Element Anal. Des.*, **15**, 1 (1993): 69—91
- 158 Hirt C W, Amsden A A, Cook J L. An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds. *J. of Comp. Phys.*, **14** (1974): 227—253
- 159 Donea J. Arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element methods. In: Belytschka T, Hughes J R eds *Computational Methods for Transient Analysis* Elsevier Science Publishers, Netherlands (1983): 473—516
- 160 Liu Z H, Huang Y Y. An arbitrary Lagrangian-Eulerian boundary element method for large-amplitude sloshing problem. In: Du Q H ed *Theory and Applications of Boundary Element Methods* International Academic publishers, Beijing (1991): 153—160
- 161 Huang Y Y et al Fluid-structure impact analysis with a mixed method of arbitrary Lagrangian-Eulerian BE and FE *Acta Mechanica Solida Sinica*, **6**, 4 (1993): 365—376
- 162 钱勤 分析撞水和动接触问题的计算方法和数值模拟 华中理工大学力学系工学博士论文 (1994)
- 163 Nomura T. ALE FE computations of fluid-structure interaction problems *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, **112**, 1—4 (1994): 291—308
- 164 Calayir Y, Dumanoglu A A. Static and dynamic analysis of fluid and fluid-structure systems by Lagrangian method *Comput. Struct.*, **49**, 4 (1993): 625—632
- 165 缪经良, 欧阳怡 储液水槽的大晃动解 第3届全国振动理论及应用学术会议文集, 哈尔滨工业大学 (1987): 1374—1381
- 166 王照林, 张乃恭 微重力充液系统大辐晃动动力学及其在航天高技术中的应用 包含于: 黄文虎, 陈滨, 王照林主编, 一般力学 (动力学、振动与控制) 最新进展 科学出版社, 北京 (1994): 68—74
- 167 Feng Z X, Huang T C. On the coupling methods for coupled problems *Acta Mathematica Scientia*, **7**, 2 (1987): 197—205

- 168 杜庆华, 吴有生, 冯振兴. 流固耦合振动问题的某些工程处理方法 固体力学学报, **9**, 1 (1988): 49—61
- 169 冯振兴, 李正秀. 不定边界的BE/FE 数学模型 力学进展, **21** (1991): 491—496
- 170 Feng Z X. BEM model for 3-D transient sloshing In: 5th Japan-China Sym. on BEM, Elviester, Sapporo, Japan (1993)
- 171 Feng Z X. A Lagrangian model for time-dependent sloshing in an arbitrary container using BEM. *Chinese J. of Num. Math. and Applications*, **17**, 1 (1995)
- 172 Huang Y Y. A mixed FE-BE method for coupled vibrations of floating plates of complicated shape *Appl Math Modelling*, **14** (1990)
- 173 Liao Chung-Li, San Yee-W in, Flutter analysis of stiffened laminated composite plates and shells in supersonic flow. *IAA J.* **31**(10) (1993): 1897—1905
- 174 Abbas J F, Ibrahim R A, Gibson R F. Nonlinear flutter of orthotropic composite panel under aerodynamic heating. *IAA J.* **31**, 8 (1993): 1478—1488
- 175 Shimura M, Sekine A. Interaction analysis between structure and fluid flow for wind engineering. *Wind Eng. Indust Aerodyn*. **46—47** (1993): 595—604
- 176 Luongo A, Fabio F D. Multimodal golloping of dense spectra structures. *J. Wind Eng. Indust Aerodyn* **48**, 2/3 (1993): 163—174
- 177 Cai Y, Chen S S. Nonlinear dynamics of loosely supported tubes in crossflow. *J Sound. Vib*, **168**, 3 (1993): 449—468
- 178 Semler C, Li G X, Paidoussis M P. Nonlinear equations of motion of pipes conveying fluid. *J. Sound. Vib*, **165**, 5 (1994): 577—599
- 179 Coquart L. et al. Fluid-structure interaction problem in biomechanics: prestressed vibrations of the eye by the FEM. *J. Biomech.*, **25**, 10 (1992): 1105—1118
- 180 Wang D M, Tarbell J M. Nonlinear analysis of flow in an elastic tube (artery), steady streaming effects. *J. Fluid Mech.*, **234** (1992): 341—358
- 181 Tarbell J M. Influence of blood rheology and vessel wall motion on arterial fluid mechanics. *Appl Mech. Reviews* **47**, 6, part 2 (1994): s291—s295
- 182 Rabbitt R D, Damiano E R. Fluid-structure interaction in the ampullary region of the vestibular semicircular canal. *ASME, Bioengineering Division*, **29** (1995): 317—318
- 183 Tsukimori K et al. Formulation of dynamics stability of fluid-filled shells. *Nucl. Eng. Des.*, **142**, 2/3 (1993): 267—297
- 184 Tsukimori K. et al. Dynamic stability characteristics of fluid-filled shells under multiple excitations. *Nucl. Eng. Des.*, **142**, 2/3 (1993): 299—318
- 185 Chiba M. Nonlinear hydroelastic vibration of a cantilever cylindrical tank, I Experiment-empty case. *Int. J. Non-linear Mech.*, **28**, 5 (1993): 591—599
- 186 Chiba M. Nonlinear hydroelastic vibration of a cantilever cylindrical tank, II Experiment-liquid-filled case. *Int. J. Non-linear Mech.*, **28**, 5 (1993): 601—602
- 187 Kwon Y W, Fox P K. Underwater shock response of a cylinder subjected to a side-on explosion. *Comput. Struct.*, **48**, 4 (1993): 637—646
- 188 Arnold V I. *Mathematical Methods of Classical Mechanics*. Springer-Verlag, New York (1978)
- 189 钟万勰. 振动、波与辛数学. 包含于: 黄文虎等编, 一般力学 (动力学、振动与控制) 最新进展, 北京科学出版社 (1994): 75—90
- 190 Sudarshan E C G, Mukunda N. *Classical Dynamics: a Modern Perspective*, John Wiley and Sons, Chichester (1974)
- 191 Abraham R, Marsden J E. *Foundations of Mechanics*, 2nd ed., The Benjamin Cummings Publishing Company. NC, USA (1978)
- 192 Guckenheimer J, Holmes P. *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*, Springer-

- Verlag, New York (1983)
- 193 Campbell D, Ecker R, Hyman JM. Nonlinear science: the next decade In: Proc 10th Annual Int Conf of the Center of Nonlinear Studies, 21—25 May (1990), Los Alamos, NM 87545, USA, Elsevier Science Publishers B. V., Netherlands (1990)
- 194 Tan Ming-yi, A Viscous Boundary Element Approach to Fluid Flow-structure Interaction Problems, Ph. D. Thesis, University of Southampton (1994)
- 195 诸德超, 陈桂彬, 邹丛青合编 气动弹性力学 航空工业教材编审室, 北京 (1986)
- 196 国家自然科学基金委员会, 自然科学学科发展战略报告: 工程热物理与能源利用 科学出版社, 北京 (1995): 51
- 197 Wu Yousheng, Price W G. Advances in hydroelasticity of ships, In: [131]
- 198 Morand H J-P, Ohayon R. Fluid-Structure Interaction. John Wiley and Sons, Chichester (1995)
- 199 Wilson J F ed Dynamics of Offshore Structures. John Wiley and Sons, Chichester (1984)
- 200 Dawson T H. Offshore Structural Engineering. Prentice-hall, New Jersey (1983)
- 201 Hughes T J R, Jansen K. Finite element methods in wind engineering. *J. of Wind Eng. Ind. Aera*, **46—47** (1993): 297—313
- 202 Engel R. Analysis of fluid-structure interaction problems in nuclear reactor engineering. *Int J. Comp. Appl Tech.*, **7**, 3—6 (1994): 193—205
- 203 Fujita K. Fluid-induced vibration and fluid-structure interaction in nuclear power-plant components. *J. Wind Eng. Ind. Aera*, **1—2**, Ch. 44 1—2 (1990): 405—418
- 204 温德超, 郑兆昌, 孙焕纯 储液罐抗震研究的发展. *力学进展*, **25**, 1 (1995): 60—76

A SURVEY ON THE FLUID-SOLID INTERACTION MECHANICS

Xing Jingtang Zhou Sheng Cui Erjie

Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing Institute of Aerodynamics

Abstract This paper reviews the fluid-solid interaction mechanics and its principal characteristics research topics, some advances and the tendency of further developments

Keywords *fluid-solid interaction; aeroelasticity; hydroelasticity; nonlinear dynamics; computational mechanics*