

复杂机械结构中高频动响应能量有限元方法研究

祝丹晖, 解妙霞, 孔祥杰, 张文博, 陈花玲

(西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

[摘要] 从理论研究和应用研究两个方面追踪了国内外关于能量有限元的发展现状, 并指出能量有限元已趋向于预示越来越复杂的结构动响应; 接下来介绍本课题组近年来利用能量有限元方法针对实际复杂结构及复杂载荷环境中的高频动响应问题所做的研究工作, 主要包括3个部分: 一是在考虑多种传递波功率流耦合的情况下, 发展了圆柱壳、截锥壳等复杂结构的高频响应能量有限元方法, 从而得到了此类结构的中高频局部动响应特性; 二是考虑在脉动载荷、混响室等复杂环境中, 利用能量有限元方法并结合能量边界元方法预示了结构的高频振动特性和声振耦合特性; 三是开发了能量有限元的计算软件, 为其大规模应用奠定了基础。最后指出了能量有限元方法目前存在的问题和进一步研究的方向。

[关键词] 中高频响应; 能量有限元方法; 声振响应预示; 机械结构; 动力学

[中图分类号] O242.21 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)01-0106-07

1 前言

飞行器、船舶及汽车等交通运输工具在民用和国防工业中占有极为重要的地位。为了提升性能, 此类结构系统变得越来越复杂, 如从几何轮廓到板梁壳不同构件及外壁(蒙皮)、框架(桁架)的连接方式, 从单一各向同性材料到多种各向异性材料并存等都在发生改变。近年来, 随着结构轻量化和动力性能需求的提升, 此类复杂系统的中高频动响应越来越突出, 这会引出两个问题: 一是长期高强度中高频动响应会导致结构系统产生疲劳, 甚至断裂, 从而造成严重甚至不可挽回的后果; 另一个是中高频声振耦合效应会形成噪声污染, 这与当今强调性能、舒适与环保统一的趋势相悖。因此, 如果能在结构设计阶段对动态响应进行预示并据预示结果进行结构优化, 则能从本质上解决问题, 并且可大幅提高研发效率以及降低成本。

针对不同频率范围的响应特性, 其表征方式和

理论依据也不同。低频响应是由全局模态主导的, 通常采用振幅与相位表达, 相对来说研究最为透彻和广泛。多种确定性方法都可较为精确地预示其响应特性, 如工程中常用的各种数值方法, 基于模态理论的有限元(FEM)、边界元(BEM)等。随着频率的升高, 结构动响应转由局部模态主导, 模态叠加逐渐严重, 各位置之间的相位差逐渐可以忽略。若利用现有的确定性方法求解, 如FEM, 为了满足计算精度的要求, 单元数会随频率的升高呈几何级数增长, 计算规模和时间也陡然增加; 同时由于单元数量的剧增, 形函数引起的局部误差也会由于累积而被显著放大, 计算精度也得不到保证。

因此, 中高频响应尤其是高频响应的表征方式, 更趋于描述平均意义上的响应。目前广泛应用的统计能量法(SEA)就是此类表征的典型, 该方法的优点在于统计平均所带来的高效率。但正由于统计特性的需求, 使用此方法时必须满足划分的子系统内模态密度大于5或模态叠加因子大于1的准

[收稿日期] 2012-08-31

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(11172222); “教育部长江学者与创新团队发展计划”项目(IRT1172)

[作者简介] 陈花玲(1954—), 女, 陕西韩城市人, 教授, 研究方向为机械振动与噪声控制理论与技术; E-mail: hlchen@mail.xjtu.edu.cn

则,因而较粗且合理的子系统划分需要一定的经验,这使其难以精确预示子系统内局部位置的响应,也就无法充分表征结构的几何特性,无法有效反映子结构的非均匀阻尼特征或非均匀载荷特性,且不易进行实际结构形态的设计与优化,这些都成为SEA不易跨越的难题。所以,为了更准确和快速地预示中高频机械结构的响应,就需要改进或提出新的方法。

能量有限元方法(EFEM),也称为功率流有限元方法(PFFEM)或能量流有限元方法(EFFEM),是用来预示结构中高频动响应的一种新方法,它视能量以波动形式在结构中传递,以有限元离散结构,从而可得到结构上所有感兴趣点的能量及响应信息,使结构的局部几何特性及阻尼特征可以得到充分表达,非均匀分布的载荷也能严格描述。相比常用的有限元分析(FEA)来讲,EFEM预示结构中高频响应具有模型简单、精确度高、计算量小的优势;而相比SEA来讲,EFEM能够对局部阻尼或局部受载结构的局部响应进行预示,在获取结构中高频局部响应特性方面具有独特优势;EFEM的这些优点使得它在分析复杂结构时,能够深入反映结构的复杂细节信息,非均匀结构材料特征均能得到有效的考虑,因此EFEM是复杂结构中高频响应预示的有效工具,是一种非常具有研究价值和发展前景的中高频动响应预示方法。

本文在归纳综述EFEM基本理论及其应用研究基础上,结合笔者所在的研究团队近年来的研究工作,重点讨论了EFEM在复杂结构系统和复杂载荷环境中的理论发展及应用,最后指出了进一步的发展方向。

2 能量有限元方法理论研究进展

EFEM来源于早期能量流方法^[1](EFM),而能量流方法也是基于功率流动的。以一个微元体为例,它有以下几个基本假设。

1) 假设在所分析的结构或声空间微元体是稳态的线弹性系统、各向同性,同时内部能量守恒,即输入微元体的总功率等于通过微元体边界的能量流与微元体内部耗散功率之和,如式(1)所示

$$\int_S \mathbf{I} \cdot \mathbf{n} dS + \Pi_{\text{diss}} = \Pi_{\text{in}} \quad (1)$$

式(1)中, \mathbf{I} 为波场强(结构声强),表达了能量在微元体内的流动特性; \mathbf{n} 为波场强的方向矢量; S 为微元体边界; Π_{diss} 为微元体耗散功率; Π_{in} 为输入微元体功率。

2) 假设微元体内所分析的某种波在感兴趣的

频率范围内形成混响场。

3) 假设微元体的结构(流体)阻尼很小,即在所分析的中高频范围内不对波的传递产生决定性影响。

4) 假设微元体内传播的波之间不相关。

根据以上假设,在稳态条件下,结合微元体运动方程的波动解析解,通过对主变量能量密度的时间与空间的平均,可推导出微元体内功率流与能量密度的关系;并以假设1)为基础,引入功率流与波场强的关系和耗散特性关系,就可以得到经典的能量密度控制方程。以杆的纵波为例,其能量密度控制方程如式(2)所示

$$-\left(\frac{C_L^2}{\eta\omega}\right)\nabla^2 \bar{e}(x) + \eta\omega \bar{e}(x) = \bar{\pi}_{\text{in}} \quad (2)$$

式(2)中, C_L 为纵波群速度; η 为结构损耗因子; ω 为角频率; \bar{e} 为时间平均的能量密度; $\bar{\pi}_{\text{in}}$ 为输入的时间平均功率密度(对于杆而言,不需要做空间平均就可推出能量密度控制方程,而对其他波型为了得到功率流与能量密度的关系,均需要做空间平均)。可以看到,能量密度控制方程是二阶偏微分方程,很容易通过数值方法得到响应值,因此Nefske和Sung在1989年提出了利用有限元方法求解能量流方程的能量流有限元法^[2],由此开创了能量有限元分析(EFEA)理论的先河,即对式(2)应用伽辽金加权残值法后,可得到式(3)

$$\int_a^b \psi \left[-\left(\frac{C_L^2}{\eta\omega}\right)\nabla^2 \bar{e}(x) + \eta\omega \bar{e}(x) - \bar{\pi}_{\text{in}} \right] dx = 0 \quad (3)$$

式(3)中, ψ 为形函数; a 和 b 为所求杆的两端坐标。此式经过有限元离散后组装成为矩阵形式,可简写为

$$\mathbf{K}e = \mathbf{F} + \mathbf{Q} \quad (4)$$

式(4)中, \mathbf{K} 为动刚度矩阵; e 为所有离散节点的时间平均能量密度值; \mathbf{F} 为外部输入功率; \mathbf{Q} 为各个单元间的功率传递值。

1992年Bouthier等推导出了平板和膜的能量密度微分方程^[3],从而将EFEM的研究由一维结构扩展到二维结构。

而1995年之前的EFEM研究都仅停留于单一构件的高频振动响应预示。为了将此方法应用于耦合结构,1995年Huff和Bernhard^[4]建立了结构几何属性或材料物理属性不连续时的节点模型,推导了不连续处单元间能量转移系数矩阵 \mathbf{J} ,并使式(4)变为

$$(\mathbf{K} + \mathbf{J})e = \mathbf{F} \quad (5)$$

从而建立了基于简单耦合结构的EFEM方程。

1996年Bitsie推导了板和声空间的耦合关系^[5],

并将声空间对结构声辐射的影响融入能量密度控制方程中,同时也结合 Kipp 等^[6]在早年推导的声空间间接边界元方法,得到了能量边界元方法(EBEM)的雏形。后来, Bernhard 等^[7]利用流体载荷下的箱体对板声振耦合关系进行了验证。以上两项研究为 EFEM 和 EBEM 在声振领域的扩展起到了重要的作用。而在 2008 年, Lee H W 等^[8]将 EBEM 扩展到梁、板等结构,进一步拓展了 EBEM 方法。

随着 EFEM 开始预示较大的结构,其计算量、求解时间和难度也在不断增大。因此,在 2000 年, Wang S^[9]利用有限体积法求解能量密度控制方程,并称其为零阶能量有限元方法(EFEM⁰)。这种方法相比于经典 EFEM 最大的优势在于通过有限体积法离散得到的方程组是线性的,很大程度上减小了计算量。另外, Wang S 利用 Smith^[10]对中高频响应可以等效为直接场和混响场叠加的研究结论,提出了混合零阶能量有限元方法(hybrid EFEM⁰),并将此方法应用于大阻尼、强耦合的系统中^[11]。与 Wang S 类似, Hardy^[12]等利用 Smith 的思想,将直接场引入经典 EFEM 方程中,形成新的混合方法,该方法比 Wang S 先进的地方在于所有的耦合结构内部均考虑了直接场的存在,符合物理实际,这种方法在载荷点和结构边界处比经典 EFEM 结果更精确。

在载荷形式的研究中,游进等^[13]将 EFEM 可预示的环境载荷从周期激励发展到随机激励,推导了随机激励作用下框架梁结构、耦合板等结构的能量流方程,同时分析了随机能量流与 SEA 的理论关联。

此外,孙丽萍^[14]、殷学文^[15]分别对 EFEM 早期理论及发展做了阐述,重点分析了 SEA 和 EFEA 理论上的联系与区别;游进等则从基本结构与耦合结构的角度描述了能量流方法的发展历程,重点描述了结构随机能量流分析方法的发展; Bernhard R 和 Wang S^[16]描述了经典 EFEM、EFEM⁰ 和 Hybrid EFEM⁰ 的基本推导过程,相互联系,并研究了 EFEM⁰ 与 SEA 的联系。

总体来看,随着研究者对 EFEM 理论研究涉及面不断的加强和深入,从简单的杆结构发展到板结构,从耦合杆发展到耦合板再到结构—声空间耦合,从周期载荷发展到随机载荷,EFEM 从早期的被质疑发展到今天被越来越多的学者认可。

3 能量有限元方法的应用研究进展

随着 EFEM 理论研究的发展,其相关的应用研

究也伴随着发展起来。

1998 年, Vlahopoulos N 等^[17]将护卫舰和渔船的结构简化为板的组合,将 EFEM 应用在这个组合体中,得到了组合体的响应特性分布,这是较早的 EFEM 应用在真实结构上的实例之一。2005 年, Zhang Weiguo 等^[18]结合周期结构理论(PS)和 EFEM 研究了双向加筋圆柱壳受流体载荷时的结构响应与内场声压分布,其关键贡献是利用 PS 理论将加强筋的影响等效为 EFEM 中能量传递系数的一部分,并将外部重流载介质对结构的影响看作附加质量和辐射阻抗考虑进能量有限元方程中,此项研究分别利用船舶和航天器结构做了例证。另外, Vlahopoulos N 等^[19]推导了点焊处节点的能量转移系数,并将 EFEM 应用于汽车领域中。Manning P A^[20]利用 EFEM 预示了多个离散声源作用下简化汽车底盘结构的振动响应和声辐射特性。

为了考虑厚板和复合材料结构的高频响应, Park Y H 等^[21]推导了 Mindlin 板的能量流方程,其中考虑到了剪切变形和转动惯量对高频响应的影响; Yan X^[22]在均匀扩散场假设条件下,忽略了各向异性板波动群速度的非均匀分布,推导了层合复合结构内弯曲波和面内波的 EFEM 方程; Lee S M^[23]在文献[22]的基础上,在 EFEM 方程中使用了角平均化的群速度和结构损耗因子,从而间接考虑了波群速度在非均匀扩散场中的角依赖性问题,同时利用谱单元方法考虑了层合材料间的剪切效应,最后结合文献[18]中 PS 理论和 EFEM 结合的成果,对复合层合板构成的飞机加筋舱段进行了中高频动响应分析。

在优化设计的研究方面, Dong J 等^[24]利用 EFEM 研究了高频结构声系统的灵敏度和优化设计问题; Borlase 和 Vlahopoulos^[25]利用 EFEM 对多板耦合结构进行了阻尼分布的优化,并通过船舶简单结构与 SEA 结论进行了验证。

以上这些研究说明 EFEM 已初步应用于航空、汽车、舰艇等实际结构上,但总体来说还是局限于较为规则的耦合板结构,即便是关于复合层合材料的研究也在关键问题上运用了多种假设和等效;此外,载荷形式也相对简单,多限于周期点载荷以及稳态流场。

4 本课题组在复杂载荷环境中复杂结构的能量有限元预示方面的探索

为了能够将 EFEM 方法应用于复杂载荷环境和

复杂结构系统,近些年来,笔者所在的研究团队对此开展了深入的研究工作。

针对某实际大型复杂结构系统在复杂载荷条件下的预示要求,分析了EFEM方法的进展^[26],通过杆、梁、板结构EFEM方程的比较,给出了通用的能量密度控制方程^[27],如式(6)所示

$$-\frac{C_{g_m}^2}{\eta_m \omega} \nabla^2 \langle \bar{e} \rangle + \eta_m \omega \langle \bar{e} \rangle = \langle \bar{\pi}_{in} \rangle \quad (6)$$

式(6)中, η_m 为 m 构件相应波形的迟滞阻尼损耗因子; $\langle \bar{\pi}_{in} \rangle$ 为 m 构件相应波形的时间和空间平均输入功率密度; C_{g_m} 为 m 构件相应波形的群速度。

基于薄壳理论首次推导出了同时考虑入射弯曲波及反射弯曲波的轴对称载荷下圆柱壳的高频弯曲振动EFEM方程^[28],如式(7)所示

$$-\frac{4C_f^2}{\eta \omega} \frac{d^2 \langle \bar{e} \rangle}{dx^2} + \eta \omega \langle \bar{e} \rangle = \langle \bar{\pi}_{in} \rangle \quad (7)$$

式(7)中, C_f 为圆柱壳内弯曲波群速度。

在此基础上求解有限长圆柱壳体上的振动能量分布。如图1所示为圆柱壳结构在轴向坐标为0.5 m处的壳面圆周上受横向周期载荷激励时,各点能量密度随轴向空间变化的结果,并与SEA方法(将整个圆柱壳体作为一个子结构)进行了比较,两者平均能量密度一个为3.19 J/m²,另一个为3.18 J/m²,可见相对误差极小,从而验证了圆柱壳弯曲振动EFEM的正确性;但同时可以看到SEA的能量密度在轴线方向是一条直线,即整个圆柱壳的能量密度仅为一个平均值,而EFEM的结果是随着远离载荷点而呈减小的趋势,完整反映了能量密度在空间的变化,从而体现了EFEM相比于SEA方法的优势。

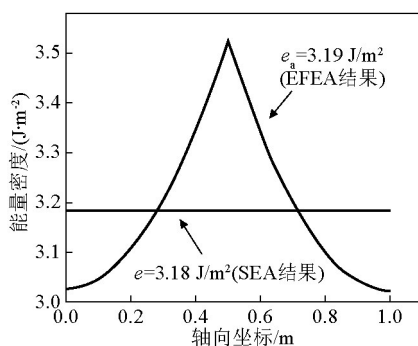


图1 沿圆柱壳轴向分布的EFEM和SEA的能量密度
Fig.1 The distribution of energy density of EFEM and SEA along the axial of cylindrical shell

为了预示某实际截锥壳结构的高频动响应,课题组提出利用平板壳元替代曲面壳元的方法解决

截锥壳EFEM方程过于复杂的问题^[29],即就单元而言,假设横向弯曲位移和面内位移非耦合,从而分别研究各自的变形特性然后再组合。单元组装时,由于相邻平板壳元并不在相邻平面,需同时考虑弯曲波,纵向波和剪切波的耦合,因此建立了复杂多波形在节点的能量传递矩阵。根据此成果得到的EFEM方程,同时结合文献[5~7],得到了复杂结构高频声振耦合响应的EFEM方程^[30],其中不仅考虑了弯曲波与声场的耦合,且同时考虑了结构系统内多波之间的功率传递,更加接近实际情况;在此基础上,分析了点源载荷、面源载荷、随机激励载荷、脉动载荷和湍流场等复杂外部环境下的结构高频响应特性和内声场声压特性。

图2是在截锥壳结构小端面表面的某点P施加载荷值为50 kN、频率为2 088.1 Hz的激励时,利用EFEM计算得到的声振耦合特性,其中图2a为壳体弯曲振动能量密度分布云图,图2b为XZ坐标平面上的壳体内部声压级分布云图。

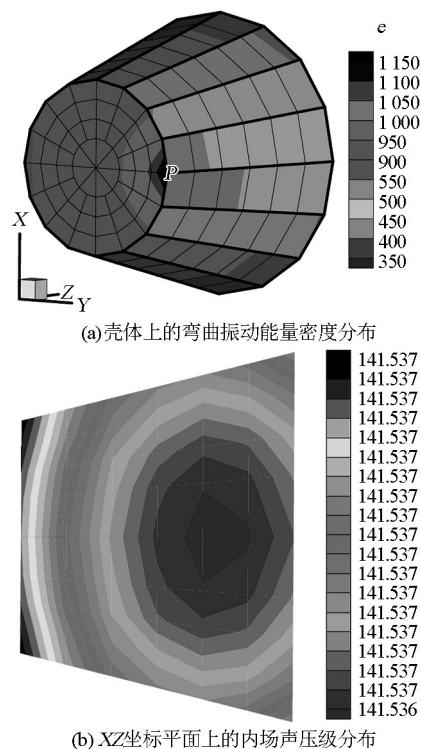


图2 点载荷作用下的截锥壳结构响应及内部声压分布
Fig.2 The distribution of vibrational energy density and internal sound pressure of truncated conical shell under a point loading

图3是截锥壳结构在湍流压力场作用下(见图3a),利用EFEM方法计算得到的截锥壳中B点(见图3b)的弯曲振动响应随频率的变化结果(见图3c);由于EFEM可以直接利用有限元商业软件

得到的有限元网格模型计算而不必单独划分新的网格,这也是其具有发展潜力的重要原因之一。

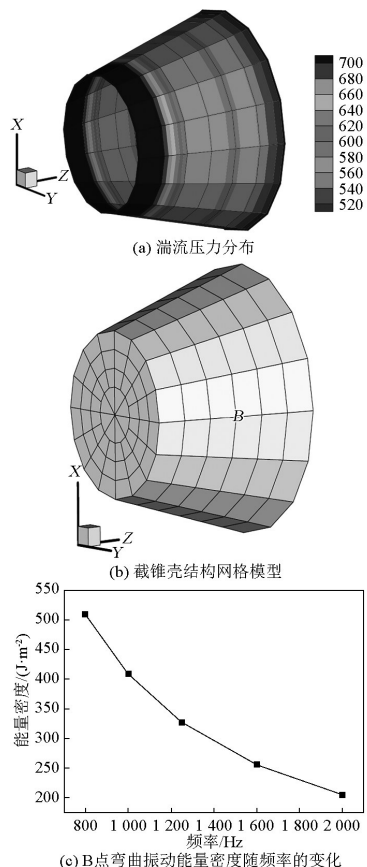


图3 湍流压力分布、截锥壳网格模型B点弯曲振动能量密度随频率的变化曲线

Fig.3 The distribution of turbulent pressure, FE Model of truncated conical shell and the relation between flexural energy density and the load frequency at point B

另外,课题组利用EFEM和EBEM结合的方法预示了复杂截锥壳结构在气动载荷和混响室条件下的高频声振耦合特性^[6]。如图4所示是假设截锥壳在1.15 M(1 M=340 m/s)、0°攻角的气动载荷作用下,计算频率为2 000 Hz时的外声场能量密度分布特性,图中所示的平面是过截锥壳中心的纵剖平面。

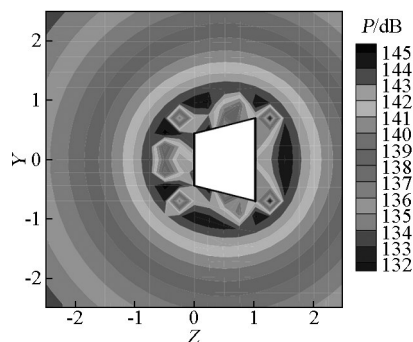


图4 截锥壳外平面场点上的声压分布

Fig.4 The distribution of sound pressure at the outside of the truncated conical shell

在另一项研究中,课题组针对实际结构的高频响应中瞬态解往往具有重要意义,而现有EFEM仅考虑稳态解的问题,利用时间边界条件,得到了结构高频瞬态能量密度控制方程,此方法为EFEM应用于瞬态时间、频率和空间分布的结构响应奠定了理论基础^[31]。

在以上研究成果基础上,开发了基于EFEM的结构高频振动预示软件^[32],该软件使用了现有商业软件划分的有限元网格来获取单元节点信息,然后利用EFEM推导的结构内部刚度矩阵和结构耦合、结构—声耦合的能量转移矩阵 J_{ss} 、 J_{sa} 形成组集刚度矩阵,其求解步骤与常用的有限元方法类似,软件的求解器流程图如图5所示。

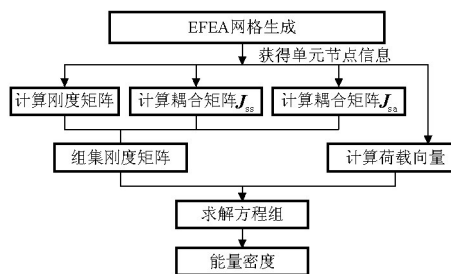


图5 EFEM求解器流程图

Fig.5 Flow chart of EFEM Solver

该软件能够预示板壳、锥壳结构等复杂结构的高频弯曲波、扭转波和剪切波的中高频响应及其声振耦合特性,这为能量有限元应用于实际复杂机械结构系统提供了有力支持。

5 结论

EFEM预示着复杂机械结构中高频响应不仅可以体现结构空间细节、阻尼及载荷非均匀分布特征,而且计算量相对小、精度高,较好地结合了FEM和SEA的优点,其理论在相对较短的时间内发展到了比较深的层次,在应用方面也已涉及到飞行器、船舶、汽车等较为广泛的领域,因此具有重要的研究价值与应用前景。本课题组近年来针对实际复杂载荷条件下的复杂结构的中高频响应预示做了较为深入的研究工作,推导了圆柱壳弯曲能量密度控制方程;利用平板壳元替代曲面壳元的方法,得到了存在弯曲波、剪切波和纵波的截锥壳结构的高频响应特性,而这部分的研究成果对于将EFEM应用于飞行器、船舶和汽车等结构具有非常重要的意义。其次,研究得到的结构在点源载荷、面源载荷、随机载荷、湍流载荷和混响室条件下的高频振动响

应和内外声场特性,也较为完整地体现了结构所处的复杂载荷环境。而课题组开发的EFEM计算软件也是在之前理论推导和简单应用的基础上向实际大规模计算所做的重要工作。

但是,相比于FEM和SEA方法的成熟程度,EFEM还有不少问题尚待解决,比如在复杂结构的EFEM方程推导中引入了假设条件、推导不完善、相应的载荷条件也进行了较多的简化,这些都不能完全反映实际状况;另外,与SEA类似,EFEM对于耦合结构间的能量转移系数的计算较为复杂,如何简化和提高其计算效率是实际应用中的重要问题;最后,求解器的完善以及软件的开发等均亟待进一步的研究和深入。

参考文献

- [1] Belov V, Ryback S. Applicability of the transport equation in the one-dimensional wave propagation problem[J]. Akust Zh Sov Phys Acoust. (Journal of Soviet Physics-Acoustics), 1975, 21(2):110-114.
- [2] Nefske D, Sung S. Power flow finite element analysis of dynamic systems- Basic theory and application to beams[J]. ASME, Transactions, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, 1989, 111:94-100.
- [3] Bouthier O M, Bernhard R J. Models of space averaged energetics of plates[C]//NASA. Aeroacoustics Conference, 13th. Tallahassee: AIAA, 1990.
- [4] Huff J E, Bernhard R J. Prediction of high frequency vibrations in coupled plates using energy finite elements[C]// Internoise 95, Newport beach CA, USA, 1995.
- [5] Bitsie F. The structural-acoustic energy finite-element method and energy boundary-element method[D]. Indiana: Purdue University, 1996.
- [6] Kipp C, Bernhard R. Prediction of acoustical behavior in cavities using an indirect boundary element method[J]. ASME Transactions Journal of Vibration Acoustics, 1987, 109:22-28.
- [7] Bernhard R J, Huff J E. Structural-acoustic design at high frequency using the energy finite element method[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1999, 121(3):295-301.
- [8] Lee H W, Hong S Y, Park D H, et al. Energy flow boundary element method for vibration analysis of one and two dimension structures[J]. Shock and Vibration, 2008, 15(1):33-50.
- [9] Wang S. High frequency energy flow analysis methods: Numerical implementation, applications, and verification[D]. Indiana: Purdue University, 2000.
- [10] Smith M J. A hybrid energy method for predicting high frequency vibrational response of point-loaded plates[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 202(3):375-394.
- [11] Wang S, Bernhard R J. Prediction of averaged energy for moderately damped systems with strong coupling[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 319(1-2):426-444.
- [12] Hardy P, Ichchou M, Jézéquel L, et al. A hybrid local energy formulation for plates mid-frequency flexural vibrations[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2009, 28(1):121-130.
- [13] 游进, 孟光, 李鸿光. 声振系统中高频能量流分析法研究进展[J]. 振动与冲击, 2012, 31(11):62-69.
- [14] 孙丽萍, 聂武. 船舶结构振动噪声分析及其进展[J]. 船舶力学, 2003, 7(1):116-121.
- [15] 殷学文, 崔宏飞, 顾晓军, 等. 功率流理论、统计能量分析和能量有限元法之间的关联性[J]. 船舶力学, 2007, 11(4):637-646.
- [16] Bernhard R, Wang S. Energy Finite Element Method[M]. Computational acoustics of noise propagation in fluids - finite and boundary element methods. Steffen Marburg, Bodo Nolte. Berlin: Springer Berlin Heidelberg:287-306, 2008.
- [17] Vlahopoulos N, Garza-Rios L O, Mollo C. Numerical implementation, validation, and marine applications of an energy finite element formulation[J]. Journal of ship research, 1999, 43(3):143-156.
- [18] Zhang Weiguo, Vlahopoulos N, Wu K. An energy finite element formulation for high-frequency vibration analysis of externally fluid-loaded cylindrical shells with periodic circumferential stiffeners subjected to axi-symmetric excitation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 282(3-5):679-700.
- [19] Vlahopoulos N, Zhao X, Allen T. An approach for evaluating power transfer coefficients for spot-welded joints in an energy finite element formulation[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 220(1):135-154.
- [20] Manning P A. Energy finite element analysis of a vehicle floor [R]. SAE 2005 Noise and Vibration Conference and Exhibition 2005-01-2420, SAE International, 2005.
- [21] Park Y H, Hong S Y. Vibrational power flow models for transversely vibrating finite Mindlin plate[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 317(3):800-840.
- [22] Yan X. Energy finite element analysis developments for high frequency vibration analysis of composite structures[D]. Michigan: University of Michigan, 2008.
- [23] Lee S M. Energy finite element method for high frequency vibration analysis of composite rotorcraft structures[D]. Michigan: University of Michigan, 2010.
- [24] Dong J, Choi K K, Vlahopoulos N, et al. Sensitivity analysis and optimization using energy finite element and boundary element methods[J]. AIAA Journal, 2007, 45(6):1187-1198.
- [25] Borlase G A, Vlahopoulos N. An energy finite element optimization process for reducing high-frequency vibration in large-scale structures[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2000, 36(1):51-67.
- [26] 解妙霞, 陈花玲, 吴九汇. 能量有限元方法基本理论及其研究新方向[J]. 应用力学报, 2007, 24(S1):61-66.
- [27] 解妙霞. 能量有限元方法在飞行器舱壳高频声振耦合问题中的应用研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2011.
- [28] 解妙霞, 陈花玲, 吴九汇. 圆柱壳高频弯曲振动的能量有限元分析[J]. 西安交通大学学报: 自然版, 2008, 42(9):1113-1116.
- [29] Xie Miaoxia, Chen Hualing, Wu Jiuhui, et al. Application of energy finite element method to high-frequency structural-acoustic coupling of an aircraft cabin with truncated conical shape[J]. Computer Modeling in Engineering and Sciences, 2010, 61(1):1-22.
- [30] Xie Miaoxia, Chen Hualing, Wu Jiuhui, et al. An investigation of reverberation chamber high-frequency vibration-acoustic problem for an aircraft cabin title[J]. Advanced Materials Research, 2011, 179-180:311-315.
- [31] Xie Miaoxia, Chen Hualing, Wu Jiuhui. Transient energy density distribution of a rod under high-frequency excitation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(12):2701-2706.
- [32] 陈花玲, 解妙霞. 能量有限元方法计算截锥壳体高频声振耦合软件v 1.0[P]. 0176506, 2009.

Research of mid and high frequency response of complex mechanical structures using energy finite element method

Zhu Danhui, Xie Miaoxia, Kong Xiangjie,
Zhang Wenbo, Chen Hualing

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[Abstract] In this paper, recent researches about basic theory and applications of EFEM are reviewed, which indicate that the development direction of this method tend to predict the dynamic response of complex structures under the complex environments. Then, towarding to this tendency, the achievements of our research group are presented, which focus on predict the dynamical response of actual complex mechanical structures excited by complex external excitation in practical. There are three main aspects are referred: the first section is that the EFEM to predict the response of complex structures is developed by us when the power flow transfer of multi-waves considered, such as the cylindrical shell and truncated conical shell, and this method help us to obtain the local detail response of complex structures in mid and high frequency range; the second part is that we extend the EFEM to predict the vibro-acoustical characteristics of complex structures under the complex excitations, including the fluctuate pressure load and the acoustic load in reverberation chamber; the last section is that we develop the EFEM solver and the application platform, which facilitate the further practical applications of EFEM greatly. At the end of this paper, the problems to be solved and feasible research contents in the future of EFEM are pointed out briefly.

[Key words] mid and high frequency response; energy finite element method; prediction of vibro-acoustical response; mechanical structure; dynamics