

# 面向高端装备制造 CAE 技术的机遇和挑战

李跃明, 陈刚, 许丁

(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)

**摘要:** 针对高端装备制造在设计、分析、制造、服役和维护等全过程中对 CAE 的需求,从结构、流体以及流固耦合等 3 个方面概述 CAE 技术国内外进展及其面临的机遇和挑战,指出在发展具有能够对装备在极端服役环境下准确的结构、流体和流固耦合 CAE 分析技术的基础之上,需不断突破面向工程应用的多物理场耦合、跨尺度分析、多学科综合设计、产品性能评估和集成等关键技术,使 CAE 逐步向支持现代设计和全寿命周期管理转变。

**关键词:** 高端装备; CAE; 结构分析; CFD; 流固耦合

**中图分类号:** TB115      **文献标志码:** B

## Opportunity and challenge of CAE technology for high-end equipment manufacturing

LI Yueming, CHEN Gang, XU Ding

(State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** For the requirements to CAE in the whole process of the high-end equipment manufacturing in the design, analysis, manufacturing, operation, maintenance and so on, the progress of CAE technology in China and abroad, and its opportunity and challenge are reviewed and discussed from three areas, i. e., the structure, the fluid and the fluid-structure coupling. It is pointed out that based on the developments of the CAE technology that meet the accurate analysis of structural, fluid and fluid-structure coupling for equipment in extreme service environments, the key technologies such as multi-physics field coupling, cross-scale analysis, multi-disciplinary synthetical design, product performance evaluation, integration and so on should be further promoted to enable CAE to support the modern design and full life-cycle management.

**Key words:** high-end equipment; CAE; structure analysis; CFD; fluid-structure coupling

## 0 引言

制造业是国民经济的主要支柱,装备制造业是国家竞争力的集中体现,发达国家普遍将发展高端

装备产业置于战略地位. 2010 年 10 月 18 日下发的《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定(国发 2010【32】号)》,以提升制造业核心竞争力等为目标,将高端装备产业等列入战略性新兴产业。

收稿日期: 2011-11-06 修回日期: 2011-12-16

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91016008); 国家自然科学基金(10902082)

作者简介: 李跃明(1961—) 男,江苏无锡人,教授,博导,博士,研究方向为工程力学和飞行器结构设计 (E-mail) liyueming@mail.xjtu.edu.cn

我国已是世界制造大国,但与发达国家相比,自主创新能力和薄弱等问题依旧突出。我国要从“制造大国”走向“制造强国”,需要变“中国制造”为“中国创造”,而其瓶颈之一就是缺乏“中国设计”。

国务院在发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》总目标中确定,“经过15年的努力,在我国科学技术的若干重要方面实现以下目标:掌握一批事关国家竞争力的装备制造业和信息产业核心技术,制造业和信息产业技术水平进入世界先进行列。”其中,重点领域“装备制造业”的发展思路之一是“提高装备设计、制造和集成能力,用高新技术改造和提升制造业”,“数字化和智能化设计制造”被列为“优先主题”之一,并指出:重点研究数字化设计制造集成技术,建立若干行业的产品数字化和智能化设计制造平台;开发面向产品全生命周期的、网络环境下的数字化、智能化创新设计方法及技术,CAE分析与工艺设计技术,设计、制造和管理的集成技术;强调“重大产品和重大设施寿命预测技术是提高运行可靠性、安全性、可维护性的关键技术;研究零部件材料的成分设计及成形加工的预测控制和优化技术,基于知识的成形制造过程建模与仿真技术,制造过程在线检测与评估技术,零部件寿命预测技术,重大产品、复杂系统和重大设施的可靠性、安全性与寿命预测技术”。

以大规模数值模拟为主的CAE技术在工程研究中正发挥越来越重要的作用,当前CAE技术已远远超出单纯数值分析的范畴,开始在高端装备结构设计、制造、服役和维护全生命周期管理中发挥作用。2007年,美国NSF启动“通过千万亿级模拟和分析手段在科学与工程领域加速探索”计划,首选方向为与装备结构研发紧密相关的材料模拟、计算流体力学和结构力学算法。欧盟也在2008年推出类似计划,重点资助多尺度计算与工程设计。

大规模数值模拟在装备研发和基础研究中扮演越来越重要的角色。重大装备吸能、抗冲击、热管理、轻量化和多功能结构优化设计,大型零件制造过程(冷、热和特种加工)的数值模拟,面向功能、材料、结构和制造工艺因素的装备结构多学科综合优化设计方法,以及大型流体叶轮机械叶片的非线性流固耦合动力学等工程中的理论和技术研究都离不开大规模数值模拟技术的突破。如先进的计算流体力学和计算结构力学技术的出现,对大型飞机的研发产生深刻的革命性变化:发达国家飞机设计中已有30%~50%的气动数据和结构数据由计算机模拟提供;据国外资料统计,若不大量使用大规模数值模拟

技术,仅完成现代飞行器气动设计所需风洞试验就要多耗费5~10年。

CAE技术综合性高,产业附加值高,技术辐射和扩散能力强,是科学走向工程的桥梁。从当前高端装备制造领域国家重大项目和航空航天装备发展趋势看,CAE战略高技术特性日益显现,且国际合作日益紧密。进入21世纪,高端装备制造纷纷被各国重新列为优先战略领域,使得CAE技术需求旺盛。另一方面,各学科基础研究成果和应用技术的不断突破为CAE发展带来新动力。

CAE的本质不仅仅是分析,还涉及到产品设计、分析、制造和服役的全寿命过程。高端装备设计与制造都离不开现代设计理论和数值模拟技术的发展。目前,国际高端装备制造领域CAE前沿技术的发展趋势主要包括:服务于分析的多物理场响应CAE求解技术,服务于设计的优化设计技术,服务于制造技术的CAE模拟技术,以及服务于全生命周期的管理技术。而且,现代设计理念包含材料与结构一体化设计,环境与结构一体化设计以及环境、功能与结构一体化设计。

## 1 综合服役环境下的结构CAE分析技术

当前,具有战略意义的重大装备往往在复杂多物理场环境中服役,包括高温、高压、冲击、噪声、过载和复杂电磁耦合等恶劣综合环境。新型或特种装备在服役过程中往往处于振动、噪声、过载和热等综合力学环境中。服役综合力学环境的准确预示是提高结构设计水平、控制精度和缩短研制周期的关键问题,并且影响结构安全性评价,其涉及环境预示理论和实验方法,综合环境下结构动力学和振动控制及结构与环境的耦合理论和算法等关键力学问题。

以当前国际上具有代表意义的临近空间飞行器为例,严酷的气动热、气动噪声和机体振动等强烈的相互作用具有多物理场耦合特点,使飞行器服役处于超常环境中。气动热使结构产生额外的热应力,导致结构“刚化”,还可使材料特性随温度发生变化,导致结构刚度下降,从而导致声-振耦合动力学特性变化。因此,在飞行器设计和强度校核中必须考虑声-振特性。如何求解和预示超常环境下的多物理场耦合效应是临近空间飞行器研发、设计和试验必须面对的重要问题;其理论研究和数值方法涉及到空气动力学、热力学、材料学、结构力学和计算方法等多学科的交叉;其理论研究成果和数值分析结果

有助于从源头上提高我国飞行器结构设计的创新能力.因此,考虑综合服役环境的结构响应模拟为 CAE 技术带来新的挑战.这些设计的实施首先要解决力学环境和热场等多物理场响应的求解,复杂多物理场响应求解的主要手段就是数值分析.下面以热-声-振相互作用为例说明国内外的现状.

VLAHOPOULOS 等<sup>[1]</sup>用有限元法(Finite Element Method, FEM)和边界元法(Boundary Element Method, BEM)对火箭发射时的声-振环境开展数值模拟分析;NG 等<sup>[2]</sup>计算有 2 种缺陷下热防护系统在热载荷作用下的热应力;LOCKE 等<sup>[3]</sup>考虑热应力影响建立各向同性梁在热载荷和声载荷共同作用下响应的有限元方程;BEHNKE 等<sup>[4]</sup>分析飞行器的一体化金属热防护壳结构在高温、气动和声载荷作用下高温引起材料属性变化对结构动态响应的影响;JEYARAJ 等<sup>[5-6]</sup>利用 ANSYS 和 SYSNOISE 考虑结构温度变化对各向同性板、各向异性板的振动和声辐射特性的影响;KUMAR 等<sup>[7]</sup>以温度作为热载荷,采用 FEM 和 BEM 将热载荷产生的热应力以预加应力的方法施加给结构,计算椭圆功能梯度板在热环境下的声-振耦合响应;文献[8]~[10]对考虑材料特性温度效应的热对结构振动特性影响进行研究.

虽然已有一些针对热环境下结构声振特性数值研究的报道,但大多为针对梁和板等简单结构中的低频响应分析<sup>[11-43]</sup>.文献[14]和文献《热应力作用下结构声-振耦合响应数值分析》<sup>①</sup>分别考虑结构热应力和材料热效应产生的影响,分析 X-43A 整体结构的声-振耦合特性.考虑结构变形效应的研究还很少,LI 等<sup>[15]</sup>初步研究针对典型飞行器结构在过载作用下声-振力学响应问题的数值模拟方法.

另外,对声-振耦合问题不同频带的数值求解方法也不同,目前主要有 FEM、BEM 和统计能量分析(Statistical Energy Analysis, SEA).FEM 和 BEM 作为确定性分析方法,虽然理论上可在任何频率范围内预测复杂结构的声振环境,但高频区结构模态密集度高,对高阶模态参数的识别难度大,因此多用于低频问题的求解.SEA 是一种统计性质的分析方法,通过将结构与声场之间的相互作用处理成一种弱耦合,求解功率流平衡方程,获得结构与声场在系统级上的响应,适用于高频范围.

为实现宽频范围内的计算,也有研究人员将 2 种或 3 种方法联合起来求解声-振耦合响应.

SHORTER 等<sup>[16-17]</sup>提出基于波动理论的混合 FEM-SEA 方法,对复杂结构同时进行确定性和统计性建模,给出一种处理中频问题的途径,可用于宽频声-振问题的求解;SHORTER 等<sup>[18]</sup>和 LANGLEY 等<sup>[19]</sup>利用该方法计算复杂系统在宽频内的声-振特性,其中,用 FEM 描述系统中模态较少的子系统振动特性,用 SEA 描述不确定子系统的振动特性(通常有较多的模态).

WILSON 等<sup>[20]</sup>认为可对结构刚度较大的部分使用 FEM 分析,而刚度较小的部分使用 SEA 分析;GARDNER<sup>[21]</sup>提出可对结构上比较重要、起关键作用的部位使用 FEM 或 BEM 计算,其他部分则采用 SEA 分析;VLAHOPOULOS 等<sup>[22]</sup>通过 FEM 与 BEM 耦合计算的方法预测火箭发射过程中声-振环境;韩峰<sup>[23]</sup>综合使用 FEM、BEM 和 SEA 等 3 种方法研究典型截锥壳结构在宽频带内的声-振耦合特性,并得到混响实验的验证;解妙霞等<sup>[24-25]</sup>在前人求解梁、平板的基础上,发展一套适于壳结构中高频声-振耦合响应的能量有限元分析方法;YANG 等<sup>[26]</sup>利用 FEM-SEA 方法研究热应力对结构宽频声-振特性的影响;杨雄伟等<sup>[27]</sup>建立 X-43A 自由状态下结构与内声场的 FEM-SEA 混合模型,考虑热属性和热应力的影响,得到 165 dB 混响声场作用下结构在 1 800 Hz 宽频范围内的响应,研究高温环境对结构声-振特性的影响.

实际上,热、噪声和振动三者耦合的结构动力学响应求解是很难的问题,至今在理论上没有得到解决.但是,由于以微振动为主的结构动力学响应引起的热环境变化相对较小,利用结构声-振耦合理论,将热视为影响因素研究结构声-振耦合动力学响应的变化,不失为认识热、噪声和振动相互作用的初步手段.热因素又可进一步分解为材料热效应、结构热应力效应和结构热变形效应.这些都是将原问题转化为热环境作用下的声-振耦合动力学响应求解.因此,未来要模拟更为真实的多物理场环境下结构动力学响应对 CAE 分析技术提出新的挑战.

当然,大规模数值分析只有与具体的物理模拟相结合才能获得在特定领域中的强大生命力.装备结构高精度、可信的模拟关键在于科学表达物理模型,涉及材料性质、结构模型、装配部件连接、边界条件和载荷表征等关键问题,这依赖于力学理论与计算方法的突破,如多物理场耦合效应模型、整体结构动力学模型表达和虚拟试验等.

① 该文已被《计算力学学报》录用,待发表.作者是西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室的耿谦、李跃明和杨雄伟.

## 2 重大工程中的流体 CAE 技术

近年来,随着计算机硬件水平的飞速发展和计算机技术的普及,CFD 在理论上得到极大发展,涌现出一系列高精度格式网格、高质量网格生成技术和高效数值求解算法。工程应用对 CFD 软件产品设计在精度、准确度、效率、代价和精细化等方面提出前所未有的苛刻要求,这极大地促进 CFD 计算机仿真技术的发展,并在众多工业设计领域发挥着举足轻重的作用。以飞行器设计为例,在传统设计时风洞试验是获得飞行器可靠气动性能的主要途径,在某些情况下甚至是唯一途径,而计算大多只停留在采用工程经验公式进行估算的层面上。传统飞行器从雏形设计到定型生产的整个周期中,需要开展数以千计的风洞试验,以期获得各种工况下飞行器从机身、机翼到发动机以及全机等的气动参数和气动性能,这需要耗费大量时间、人力和物力成本。另一方面,由于风洞技术的限制,风洞试验很难给出流动全场的详细信息,同时天地差异的存在导致风洞试验与真实飞行状况存在较大差异。引入 CFD 仿真技术后,其快速、经济、高效、适用范围广、受限小和数据详尽等优势从根本上改变传统的飞行器设计理念,成为空天飞行器研制中强有力的工具。SILLÉN 等<sup>[28]</sup>从工程师的角度详细叙述现代飞行器设计中 CFD 方法所扮演的重要角色。

CFD 软件产品也处于蓬勃发展阶段,目前国际上著名的有 ANSYS 公司的 FLUENT 和 CFX 软件以及 CD-adapco 公司的 STAR-CCM+ 和 Star-CD 软件等。近年来 ESI 公司开发的 CFDRC 软件包的高速流动计算模块 CFD-Fastran 更是表现优异。上述商业软件通常具有较强的普适性,界面操作友好、简单,同时具有较强的处理复杂问题的能力,如具有动网格、自适应计算、跨平台计算、多物理场耦合以及大规模并行计算等能力。随着 CFD 技术在工程上发挥越来越重要的作用,强非定常流动、多物理场相互作用、高超声速流动以及复杂湍流运动机理研究变得非常重要<sup>[29-32]</sup>,传统 CFD 软件在这些新领域的应用上具有较强的局限性,亟需开展相关基础研究和软件平台开发工作。

除此之外,国外的很多大学和研究所等科研机构也开发出大量具有针对性的 CFD 数值仿真软件。以 NASA<sup>[33]</sup>为代表,自从 20 世纪七八十年代开始就非常注重仿真软件的开发,投入相当大的人力、物力

和财力,现已开发出具有不同针对性和特点的流动数值仿真软件,并已发展得相当成熟。著名的有 CFL3D, FUN3D, OVERFLOW, WIND, LAURA, VULCAN 和 GASP 等。在欧洲,有法国开发的 NSMB 流动求解器,德国 DLR 开发的结构网格流动求解器 FLOWER 和非结构网格流动求解器 TAU 以及英国开发的 PMB 流动求解器等。这些求解器在易操作性和普适性方面比商业软件逊色许多,但是他们针对各自专业领域进行优化,在处理复杂湍流、高精度计算、真实气体效应、非平衡效应以及处理燃烧化学反应等特殊能力上得到极大提升。通常这些软件都高度保密,不对外出口。另外,近来以 OpenCFD 公司<sup>①</sup>牵头的开源 CFD 仿真平台 OpenFOAM 为代表,反映来自 CFD 软件开源领域的声音,现在网络上可以自由下载 OpenFOAM 源代码,关于该软件的发展和应用的研讨会议已在国际上举办过多次。

国内在 CFD 基础算法的研究上不输于国外,并开发有自己的 CFD 仿真软件,如中国空气动力研究与发展中心张涵信<sup>[34]</sup>院士提出并发展的 NND 格式,已在我国航天、航空院所得广泛使用;开发的亚跨超 CFD 软件平台 Trip 已在基本功能、用户界面、软件测试和复杂网格处理等 4 个方面取得长足的进展<sup>[35-37]</sup>。另外,傅德薰等<sup>[38]</sup>在高精度激波分辨格式以及可压缩湍流直接数值模拟方面也做出相关研究,并将开发的 OpenCFD-SC<sup>[39]</sup>源代码公开。我国 CFD 软件开发起步较晚,与国外相比投入小,所以现有的 CFD 软件规模小、集成度低,限制我国 CFD 软件整体水平的提高。目前,既没有形成类似 FLUENT 的成熟商业化软件,也没有发展出类似 CFL3D 和 OVERFLOW 等性能优异的大型科研 CFD 软件系统。因此,需要加强各方协调,针对国家重大需求,开发适用于航空航天装备、现代交通与运载装备、能源化工装备、海洋平台和土木工程等领域的具有自主知识产权商业软件和开源的科研 CFD 软件。

## 3 重型能源动力装备中的流固耦合 CAE 技术

对于各种主、被动冷却热结构,如重型燃气轮机热端部件,人们总是希望获得尽可能准确的温度场和流场分布,从而更好地设计冷却方式,以较小的冷却量获得最佳的服役状态。传统的做法是将整个求解域分为固体区域和流体区域,然后分别处理,该过程需要重复多次且需人为调整流固边界条件,不利

① <http://www.openfoam.com>.

于计算的准确性.对于热防护结构分析与设计,热-结构耦合是迫切需要解决的关键问题,而流体-固体-热一体化耦合分析是从结构部件级层次过渡到系统层次的一个桥梁.这是因为无论结构本身模型建立得多么精细,如果其外部力学和热环境预测误差较大,也会无法准确预测结构响应,其安全性和可靠性也无从谈起.人为将环境与结构的耦合问题分为流体域与固体域,再将固体域分为材料和结构进行处理的工程技术在精细分析和设计阶段(如热-结构安全性和可靠性评估)不符合实际.

对于热环境预测以及主动冷却结构的共轭传热问题,流体-固体-热耦合分析方法已引起国外学者<sup>[40-43]</sup>的关注. LOHNER 等<sup>[44]</sup>提出一种流体-结构-热相互作用的松耦合算法; TRAN 等<sup>[45]</sup>提出一个连续的流体-结构-热求解器,用于研究空气动力学加热和气动热弹性问题; SAVINO 等<sup>[40]</sup>采用 CFD 和热应力分析模型耦合方法研究下一代可重复使用运载器的超高温陶瓷(Ultra High Temperature Ceramic, UHTC)热防护系统,结果表明外部流场和结构内部温度场在时间域的耦合模拟对正确预测 UHTC 材料表面的热载荷十分重要; HENSHAWA 等<sup>[41]</sup>采用不可压 N-S 方程与固体热传导方程耦合,发展基于重叠网格适于复杂外形的共轭传热求解器,结果表明数值仿真结果与解析解吻合很好;德国宇航院领导的 IMENS 项目<sup>[42]</sup>采用松耦合方法基于商业软件 MPCCI 集成 CFD 软件 TAU 和结构软件 ANSYS,用于分析 X-38 的 C/SIC 热防护结构的热力耦合问题,获得与试验较为一致的结果,并将其推广到气动热弹性和主动冷却结构分析领域.这些集中在热对流体-结构耦合影响的数值模拟工作充分显示数值模拟技术在工程上的作用.发展流体-热-结构耦合数值模拟方法的主要难点为不同求解器的集成,涉及到流体求解器、热求解器及结构求解器之间复杂的数据传递,如气动压力、结构位移和热载荷的传递方法自然成为关键技术.

大型叶轮旋转机械叶片非线性气动弹性是典型的流固耦合问题.随着 CFD 和计算结构动力学(Computational Structural Dynamics, CSD)以及高性能计算机的发展,基于高精度物理模型的 CFD-CSD 耦合数值模拟方法成为当前求解流固耦合问题可信度最高的方法之一.在 CFD-CSD 耦合数值模拟中,气动模型采用欧拉方程或 N-S 方程,而结构模型则采用有限元直接离散.所采用的模型比以往更能反映系统的物理本质,所以能较好地模拟气动非线性和结构非线性耦合导致的非线性气动弹性问题.

虽然表达复杂流固耦合系统的偏微分方程可以通过 CFD-CSD 耦合方法直接进行高精度的数值模拟,从而可以提供离散化流场变量的详尽时空信息,但是大型复杂系统数值模拟计算耗费巨大,针对单点状态的数值模拟方法很难直接应用于设计.因此,在 20 世纪 90 年代中期,为解决 CFD-CSD 耦合数值模拟方法用于非线性气动弹性分析计算耗费太大的问题,在 NASA 和美国空军的资助下,以杜克大学 DOWELL 教授和 NASA 的 SILVA 等为代表的气动弹性领域的学者们提出基于 CFD 数值模型构造非定常流场降阶模型(Reduced-Order Model, ROM)的想法.ROM 能以相对较少的自由度(通常在几十阶或几百阶)描述原系统的主要动力学特性,在保留全阶高精度 CFD 模型可信度和高保真度的同时,计算量又不太大(几乎可以实时获得结果),且能方便地与其他学科模型进行耦合,并用于多学科耦合分析与优化设计.<sup>[46]</sup>ROM 起源于美国,目前在欧洲(主要是英国、德国和法国)和亚洲(主要是中国、新加坡和韩国)也开始流行起来.近几年,陈刚等<sup>[47-48]</sup>将平衡截断方法应用于传统时域 POD/ROM,使得时域 POD/ROM 取得与频域 POD/ROM 相近的性能,并提出基于 POD/ROM 的气动弹性主动控制律设计方法;系统地研究基于 CFD-CSD 耦合求解器的 Volterra/ROM 建模方法,并将其用于翼型、机翼和全机气动弹性主动控制律设计<sup>[49-52]</sup>.

流固耦合系统的 ROM 技术为多学科仿真与分析提供强有力的工具,ROM 自然被寄予厚望用于进行与流场相关的多学科优化与设计.然而,目前几乎所有的 ROM 方法包括系统辨识方法和特征模态方法都是数据驱动的经验模型,模型的精度高度依赖于构建 ROM 时流场的状态(如雷诺数、初始条件和边界条件等),对流场参数变化非常敏感,缺乏足够的鲁棒性.尽管 ROM 已经在很多领域展现出优良性能,但是现有降阶模型方法还远不能满足众多工程应用领域的要求,其内容还远未完善.在未来,需要发展更多保精度、保性能和保效率的高性能大规模复杂非线性系统的降阶模型方法.

## 4 结束语

高端装备制造业战略地位日益突出,为提高装备设计、制造和集成的能力,人们对 CAE 的需求已不仅仅在于分析,完整的 CAE 技术涉及产品设计、分析、制造、服役和维护等全过程.面临如此挑战,CAE 首先需具有装备在极端服役环境下准确的结构、流体和流固耦合分析技术,从而逐步向支持现代

设计、全寿命周期管理转变。为此,CAE 技术需不断突破面向工程应用的多物理场耦合、跨尺度分析、多学科综合设计、产品性能评估和集成等关键技术,丰

富不同于计算数学和软件工程的分析理论和数值模拟方法。此外,CAE 人才的培养也应该以产品全寿命周期的知识结构为主线。

#### 参考文献:

- [1] VLAHOPOULOS N, VALLANCE C, STARK R D. Numerical approach for computing noise-induced vibration from launch environments[J]. *J Spacecraft & Rockets*, 1998, 35(3): 355-360.
- [2] NG Wei Heok, FRIEDMANN P P, WAAS A M. Thermomechanical analysis of a damaged thermal protection system[C]//Proc 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Struct Dynamics & Materials Conf, Austin, 2005.
- [3] LOCKE J, MEI C. A finite element formulation for the large deflection random response of thermally buckled beams[J]. *AIAA J*, 1990: 28(12): 2125-2131.
- [4] BEHNKE M N, SHRMA A, PRZEKOP A, *et al.* Thermal-acoustic analysis of a metallic integrated thermal protection system structure[C]//Proc 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Struct Dynamics & Mat Conf, Orlando, 2010.
- [5] JEYARAJ P, PADMANABHAN Chandamouli, GANESAN N. Vibration and acoustic response of an isotropic plate in a thermal environment[J]. *J Vibration & Acoustics*, 2008, 130(5): 051005-051010.
- [6] JEYARAJ P, GANESAN N, PADMANABHAN Chandamouli. Vibration and acoustic response of a composite plate with inherent material damping in a thermal environment[J]. *J Sound & Vibration*, 2009, 320(1-2): 322-338.
- [7] KUMAR B R, GANESAN N, SETHURAMAN R. Vibro-acoustic analysis of functionally graded elliptic disc under thermal environment[J]. *Mech Adv Mat & Structures*, 2009, 16(2): 160-172.
- [8] 周艳国,肖黎,屈文忠. 复杂结构动力学建模及高温环境下飞行器振动特性分析[C]//第1届教育部新型飞行器学术会议论文集,北京,2009.
- [9] 夏巍,杨智春. 热环境下复合材料壁板的振动特性分析[J]. *应用力学学报*, 2005, 22(3): 359-363.  
XIA Wei, YANG Zhichun. Vibration analysis to composite panels in thermal environment[J]. *Chin J Appl Mech*, 2005, 22(3): 359-363.
- [10] 刘芹,任建亭,姜节胜,等. 复合材料薄壁圆柱壳热振动特性分析[J]. *机械强度*, 2006, 28(5): 643-648.  
LIU Qin, REN Jianting, JIANG Jiesheng, *et al.* Nonlinear thermal vibration characteristic analysis of composite thin-cylindrical shells[J]. *J Mech Strength*, 2006, 28(5): 643-648.
- [11] YANG J, SHEN H S. Vibration characteristics and transient response of shear-deformable functionally graded in thermal environments[J]. *J Sound & Vibration*, 2002, 255(3): 579-602.
- [12] KIM Y W. Temperature dependent vibration analysis of functionally graded rectangular plates[J]. *J Sound & Vibration*, 2005, 284(3-5): 531-549.
- [13] 史晓鸣,杨炳渊. 瞬态加热环境下变厚度板温度场及热模态分析[J]. *计算机辅助工程*, 2006, 15(S1): 15-18.  
SHI Xiaoming, YANG Bingyuan. Temperature field and mode analysis of flat plate with thermal environment of transient heating[J]. *Comput Aided Eng*, 2006, 15(S1): 15-18.
- [14] 杨雄伟,李跃明,闫桂荣. 考虑材料物性热效应飞行器声振耦合动态特性分析[I]. *固体力学学报*, 2010, 31(S1): 134-142.  
YANG Xiongwei, LI Yueming, YAN Guirong. Vibro-acoustic dynamic analysis of aircraft with temperature-dependent material property[J]. *Chin J Solid Mech*, 2010, 31(S1): 134-142.
- [15] LI Yueming, YANG Xiongwei, LI Ling, *et al.* Dynamic response under overload-vibro-acoustic coupling for spacecraft structure[C]//Proc 2009 Asia-Pacific Int Symp Aerospace Technol, Gifu, 2009.
- [16] SHORTER P J, LANGLEY R S. Vibro-acoustic analysis of complex systems[J]. *J Sound & Vibration*, 2005, 288(3): 669-699.
- [17] SHORTER P J, LANGLEY R S. On the reciprocity relationship between direct field radiation and diffuse reverberant loading[J]. *J Acoust Soc Am*, 2005, 117(1): 85-95.
- [18] SHORTER P J, LANGLEY R S. Modeling structure-borne noise with the hybrid FE-SEA method[C]//Proc 6th Int Conf Struct Dynamics, Paris, 2005.
- [19] LANGLEY R S, COTONI V. Prediction of the ensemble mean and variance of the response of uncertain structures using the hybrid FE-SEA method[C]// Proc Int Conf Noise & Vibration Eng, Leuven, 2006.
- [20] WILSON A M, JOSEFSON L B. Combined finite element analysis and statistical energy analysis in mechanical intensity calculations[J]. *AIAA J*, 2000, 38(1): 123-130.
- [21] GARDNER B. Vibro-acoustic analysis of large space structures using the hybrid FE-SEA method[C]//46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Struct Dynamics & Mat Conf, Austin, 2005.
- [22] VLAHOPOULOS N, VALLANCE C, STARK R D. Numerical approach for computing noise induced vibration from launch environments[J]. *J Spacecraft & Rockets*, 1998, 35(3): 355-360.
- [23] 韩峰. 典型截锥壳结构的声振耦合特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2009.

- [24] 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]. 应用力学学报,2007,24(S1): 61-66.  
XIE Miaoxia, CHEN Hualing, WU Jiuhui. Energy finite element method basic theory and its new research direction[J]. Chin J Appl Mech, 2007, 24(S1): 61-66.
- [25] 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,2008,42(9): 1113-1116.  
XIE Miaoxia, CHEN Hualing, WU Jiuhui. Energy finite element analysis to high-frequency bending vibration in cylindrical shell[J]. J Xi'an Jiaotong Univ, 2008, 42(9): 1113-1116.
- [26] YANG Xiongwei, WANG Cheng, LI Yueming, *et al.* Vibro-acoustic response of a thermally stressed reinforced conical shell[J]. Adv Sci Lett, 2011, 4(8-10): 2802-2806.
- [27] 杨雄伟,李跃明,耿谦. 基于混合 FE-SEA 法的高温环境飞行器宽频声振特性分析[J]. 航空学报,2011,32(10): 1851-1859.  
YANG Xiongwei, LI Yueming, GENG Qian. Broadband vibro-acoustic response of aircraft in high temperature environment based on hybrid FE-SEA[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10): 1851-1859.
- [28] SILLÉN M, AMUNDSSON E, ARVIDSON S, *et al.* Flow modelling in aircraft design: an engineering perspective[C]//PENG S H, DOERFFER P, HAASE W. Progress in hybrid RANS-LES modelling. Heidelberg: Springer Berlin, 2010: 25-39.
- [29] FEDOROV A. Transition and stability of high-speed boundary layers[J]. Annu Rev Fluid Mech, 2011 (43): 79-95.
- [30] WU Theodore-Yaotsu. Fish swimming and bird/insect flight[J]. Annu Rev Fluid Mech, 2011(43): 25-58.
- [31] ANSARI S A, ZBIKOWSKI R, KNOWLES K. Aerodynamic modelling of insect-like flapping flight for micro air vehicles[J]. Prog Aerospace Sci, 2006, 42(2): 129-172.
- [32] SHYY W, AONO H, CHIMAKURTHI S K, *et al.* Recent progress in flapping wing aerodynamics and aeroelasticity[J]. Prog Aerospace Sci, 2010, 46(7): 284-327.
- [33] NASA. Computational fluid dynamics: codes, developments, and applications[EB/OL]. (2006-08-30) [2011-10-20]. <http://aaac.larc.nasa.gov/tsab/cfdllarc/>.
- [34] ZHANG Hanxin, ZHUANG Fenggan. NND schemes and their applications to numerical simulation of two- and three-dimensional flows[J]. Adv Appl Mech, 1991, 20(8): 193-256.
- [35] 王光学,王运涛. TRIP 2.0 软件湍流模块的开发与确认[J]. 航空计算技术,2007,37(3): 20-23.  
WANG Guangxue, WANG Yuntao. Development and validation of turbulence models of TRIP 2.0[J]. Aeronautical Computing Technique, 2007, 37(3): 20-23.
- [36] 王运涛,张玉伦,洪俊武,等. TRIP 2.0\_SOLVER 的开发与应用[J]. 空气动力学学报,2007,25(2): 163-168.  
WANG Yuntao, ZHANG Yulun, HONG Junwu, *et al.* Development and application of TRIP 2.0\_SOLVER[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007, 25(2): 163-168.
- [37] 王运涛,王光学,张玉伦. DPW III 机翼和翼身组合体构型数值模拟[J]. 空气动力学学报,2011,29(3): 264-269.  
WANG Yuntao, WANG Guangxue, ZHANG Yulun. Numerical simulation of DPW III wing and wing-body configurations[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(3): 264-269.
- [38] 傅德薰,马延文,李新亮,等. 可压缩湍流直接数值模拟[M]. 北京: 科学出版社,2010: 46-52.
- [39] 李新亮. OpenCFD-SC 二维源代码[EB/OL]. (2010-11-01) [2011-10-20]. <http://www.cfluid.com/bbs/viewthread.php?tid=89129&extra=page%3D1>.
- [40] SAVINO R, FUMO M S, PATERNA D, *et al.* Aerothermodynamic study of UHTC-based thermal protection systems[J]. Aerospace Sci & Technol, 2005, 9(2): 151-160.
- [41] HENSHAWA W D, CHAND K K. A composite grid solver for conjugate heat transfer in fluid-structure systems[J]. J Comput Phys, 2009, 228(10): 3708-3741.
- [42] HAUPT M C, NIESNER R, UNGER R, *et al.* Computational aero-structural coupling for hypersonic applications, AIAA-2006-3252[R]. 2006.
- [43] MARTELLI E, NASUTI F, ONOFRI M. Thermo-fluid-dynamics analysis of film cooling in over expanded rocket nozzles, AIAA-2006-5207[R]. 2007.
- [44] LOHNER R, YANG Chi, CEBRAL J, *et al.* Fluid-structure-thermal interaction using a loose coupling algorithm and adaptive unstructured grids, AIAA-98-2419[R]. 1998.
- [45] TRAN H, FARHAT C. An integrated platform for the simulation of fluid-structure-thermal interaction problems, AIAA 2002-1307[R]. 2002.
- [46] LUCIA D J, BERAN, P S, SILVA W A. Reduced-order modeling: new approaches for computational physics[J]. Prog Aerospace Sci, 2004, 40(1): 51-117.
- [47] 陈刚,李跃明,闫桂荣,等. 基于 POD 降阶模型的气动弹性快速预测方法研究[J]. 宇航学报,2009,30(5): 1765-1769.  
CHEN Gang, LI Yueming, YAN Guirong, *et al.* A fast aeroelastic response prediction method based on proper orthogonal decomposition reduced order model[J]. J Astronautics, 2009, 30(5): 1765-1769.
- [48] 陈刚,李跃明,闫桂荣,等. 基于降阶模型的气动弹性主动控制律设计[J]. 航空学报,2010,31(1): 12-18.

(下转第 31 页)

表 5 节点 3996 和 3999 的最大加速度和对应频率的平均值  
Tab.5 Mean of maximum acceleration and its frequency at nodes 3996 and 3999

方案	最大加速度平均值/ ( $m/s^2$ )	对应的频率平均值/Hz
1	18.3	493.7
2	20.7	493.8
3	28.6	487.2
4	17.4	498.4

### 3.3.4 体积对比

原始模型和各方案模型体积对比见表 6.

表 6 原始模型和各方案模型体积对比

Tab.6 Volume comparison of original model and models of all cases

模型	体积/ $mm^3$	降低幅度/%
原始	144 200.0	
1	113 787.2	21.1
2	110 450.0	23.4
3	111 103.1	22.9
4	113 114.1	21.6

### 参考文献:

- [1] 石琴,卢利平. 基于有限元分析的发动机罩拓扑优化设计[J]. 机械设计与制造, 2009(6): 31-33.  
SHI Qin, LU Liping. Study on FEM-based topological optimization design of engine hood [J]. Machinery Des & Manufacture, 2009(6): 31-33.
- [2] 李楚琳,张胜兰,冯樱,等. HyperWorks 分析应用实例[M]. 北京:机械工业出版社,2007: 241-249.
- [3] 张胜兰,郑冬黎,郝琪,等. 基于 HyperWorks 的结构优化设计技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008: 159-163.
- [4] 刘庆,侯献军. 基于 HyperMesh/OptiStruct 的汽车零部件结构拓扑优化设计[J]. 装备制造技术, 2008(10): 42-44.  
LIU Qing, HOU Xianjun. Structure topology optimization design of vehicle parts based on HyperMesh/OptiStruct [J]. Equipment Manufacturing Technol, 2008(10): 42-44.
- [5] 王春会. 连续体结构拓扑优化设计[D]. 西安:西北工业大学, 2005.
- [6] 黄辉阳,袁根旺. 基于 HyperMesh 的排气消声器开裂分析及优化设计[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2011(7): 69-71.  
HUANG Huiyang, YUAN Genwang. Exhaust muffler cracking analysis and design optimization based on HyperMesh [J]. CAD / CAM & Manufacturing Inform, 2011(7): 69-71. (编辑 于杰)

### (上接第 7 页)

- CHEN Gang, LI Yueming, YAN Guirong, *et al.* Design of active control law for aeroelastic systems via reduced order models [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(1): 12-18.
- [49] 陈刚,徐敏,陈士橧. 基于 Volterra 级数的非线性非定常气动力降阶模型[J]. 宇航学报, 2004, 25(5): 492-496.  
CHEN Gang, XU Min, CHEN Shilu. Reduced-order model based on volterra series in nonlinear unsteady aerodynamics [J]. J Astronautics, 2004, 25(5): 492-496.
  - [50] 徐敏,陈刚,陈士橧,等. 基于非定常气动力低阶模型的气动弹性主动控制律设计[J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(6): 748-751.  
XU Min, CHEN Gang, CHEN Shilu, *et al.* Design method of active control law based on reduced order model of unsteady aerodynamics for aeroelasticity [J]. J Northwestern Polytechnical Univ, 2004, 22(6): 748-751.
  - [51] CHEN Gang, LI Yueming, YAN Guirong. Active control system design based on reduced order model [C]// Proc 2009 Asia-Pacific Int Symp Aerospace Technol, Gifu, 2009.
  - [52] CHEN Gang, LI Yueming, YAN Guirong. Active control stability/augmentation system design based on reduced order model [J]. Chin J Aeronautics, 2010, 23(6): 639-646. (编辑 于杰)

由表 6 可知,优化后的 4 种设计方案都能节省材料 20% ~ 25%,考虑加工工艺,4 种方案在节省材料方面基本相同.

综上所述,从静强度、模态频率、频响分析和体积等方面比较,可知方案 4 为最佳方案.

## 4 结束语

通过模态频率响应仿真数据与试验数据的对比,保证模型的准确性.通过分析可知,产生模态频率响应过量的原因是激励引发吊耳的自振.通过优化工具 OptiStruct 对模型进行优化,使吊耳在满足静强度的同时,其固有频率能避开激励中振幅较大处的频率.根据优化结果提出 4 种设计方案,从静强度、模态频率、模态频率响应和体积等 4 个方面对各个方案进行对比分析,最终确定方案 4 为最佳方案.