

Simulation Analysis of the Thermo-Acoustic-Vibration Coupling of Combustion Chamber Structures

Min Zheng¹, Fan Shen², Yiming Xu¹, Tao Liu¹

¹Department of Civil Aviation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu

²Institute of Vibration Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu

Email: zhengmingsf@163.com, shenfanzm@163.com, 7750979@qq.com

Received: Jun. 1st, 2017; accepted: Jun. 16th, 2017; published: Jun. 19th, 2017

Abstract

During the aero-engine operation, the intense combustion happens inside the combustion chamber and the thermo-acoustics-vibration interaction exists unavoidably. The operating environmental under high temperature, high pressure and high acoustical level has a great influence on the fatigue life of the structure and the normal operation of the aero-engine. Simulation analysis of the thermo-acoustics-vibration of combustion chamber was done through one-way coupling by ANSYS-WORKBENCH software. At first the combustion computing was done in FLUENT module in order to obtain the data of temperature and pressure fields. Then the temperature distribution on the structure through steady thermal analysis module was obtained to feed into the pre-stress structure. Modal parameters including eight modal frequencies and eight mode shapes were identified both by one-way thermo-acoustics-vibration coupling and thermo-vibration coupling. The results show that bending and torsional modes appear at lower frequencies earlier, and the cavity modes appear at higher frequencies. In addition, modal frequencies from one-way thermo-acoustics-vibration coupling are lower than those from uncoupling.

Keywords

Thermo-Acoustic-Vibration Coupling, Fluid-Structure Coupling, Modal Analysis, Combustion Chamber

燃烧室结构的热-声-振耦合特性模拟分析研究

郑敏¹, 申凡², 徐一鸣¹, 刘涛¹

¹南京航空航天大学民航工程系, 江苏 南京

²南京航空航天大学振动工程研究所, 江苏 南京

Email: zhengmingsf@163.com, shenfanzm@163.com, 7750979@qq.com

收稿日期：2017年6月1日；录用日期：2017年6月16日；发布日期：2017年6月19日

摘要

在发动机运行过程中，燃烧室内部时刻发生着剧烈的燃烧，不可避免地存在热-声-振耦合作用，长期的高温高压高声强工作环境会对燃烧室结构疲劳寿命和发动机正常工作产生至关重要的影响。本文利用 ANSYS-WORKBENCH 软件以单向耦合的方式对燃烧室结构的热-声-振特性进行了模拟分析，即先在 FLUENT 模块中进行燃烧运算得到流体域温度场、压力场等，然后利用稳态热分析模块获得结构上的温度场分布，最后把得到的温度场和压力场作为预应力施加给结构，对内部填充气体的燃烧室做了有预应力的单向热-声-振耦合模态分析，也对不考虑声-振耦合的燃烧室结构做了热-振耦合模态分析，得到了 8 阶模态频率和模态振型。结果表明，低阶模态主要包含了弯曲模态和扭转模态，而空腔模态在较高频率才出现。此外，考虑声-振耦合作用得到的各阶模态频率比不考虑声-振耦合得到的模态频率要小。

关键词

热-声-振耦合，流-固耦合，模态分析，燃烧室

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为航空发动机三大核心部件之一的燃烧室，实际工作环境十分恶劣，不仅有来自发动机转子等机械部件的振动载荷及噪声载荷，还有燃烧引起的温度载荷及燃烧噪声的作用，而且存在热、声和燃烧室结构壁面振动的耦合现象，这种复杂的受载状况对燃烧室结构疲劳寿命和发动机正常工作有着至关重要的影响。一方面，结构受到交变的热应力载荷易造成结构热疲劳破坏，还会造成燃烧室薄壁结构的声振疲劳破坏[1]，影响整个燃烧室乃至整台发动机的总体寿命。另一方面，燃烧室声学特性同燃烧不稳定间的热-声耦合作用，不仅直接影响航空发动机的工作稳定性，导致发动机熄火危险状况发生，还会加剧结构的振动导致燃烧室结构和零部件受损。

国内有不少学者对燃烧室的声学 and 振动特性做了研究，例如张冬梅[2]分别对火焰筒的振动模态和声学模态做了模拟和实验分析，但是没有涉及声振耦合。尹帮辉等[3][4]对燃烧室模型封闭结构和出口开口两种情况下的燃烧室声腔和结构的固有频率和模态振型做了研究，郭晓玲等[5][6]利用 ANSYS 计算了燃烧室倒角对结构和声场固有频率的影响，并且研究了冷却通道对燃烧室声-固耦合特性的影响，赵银燕等[7]采用边界元方法利用单极子声源激励得到燃烧室的模拟声-振耦合特性，李彦斌等[8]分别基于有限元-直接边界元法和有限元-间接边界元法研究了随机基础激励下考虑内外声场影响的声-固耦合模型，这些文献考虑了空腔声学特性同结构振动之间的耦合作用。沙云东等[9]利用有限元法对薄壳结构在热声载荷下的大挠度非线性随机响应进行了分析，并对薄壁壳结构疲劳寿命进行了估算。尽管其中一些文献对常温和高温下结构或声模态做了研究，但是都没有涉及到燃烧产生的热和声场对声振耦合特性的影响。荷兰 Twente 大学的 Artur 等[10][11]利用 ANSYS-CFX 研究了燃烧不稳定条件下的流-固耦合作用，对燃烧室结构振动模态和声场模态以及结构振动响应和声压响应进行了模拟和实验分析。考虑到目前有关燃烧室

热-声-振这三者耦合作用的研究还很少, 本文利用 ANSYS-WORKBENCH 软件, 将 FLUENT 模块、稳态热分析模块、结构及模态分析模块等结合在一起, 对燃烧室结构做了单向热-声-振耦合模拟分析。为了更好地了解燃烧工况下声学因素对燃烧室结构振动特性的影响, 还将热-声-振耦合不考虑声学耦合的热-振模态分析结果进行了对比研究。

2. 理论

2.1. 燃烧室热-声耦合理论

燃烧室内流体动量守恒方程(斯托克斯方程)如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(p\delta_{ij} - \tau_{ij} + \rho v_j v_i) = f_i \quad (1)$$

式中: t 为时间, ρ 为流体密度, v_i 为速度, x_j 为坐标系, p 为压力, τ_{ij} 为粘性应力张量, f_i 为流动力, δ_{ij} 为罗内科函数。

两边对 x_i 求导可得

$$\frac{\partial}{\partial x_i \partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}(p\delta_{ij} - \tau_{ij} + \rho v_j v_i) = \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \quad (2)$$

此外, 根据燃烧室内流体质量守恒方程(连续性方程)可得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = m_a \quad (3)$$

式(2)和式(3)联立后得到

$$\frac{\partial m_a}{\partial t} - \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}(p\delta_{ij} - \tau_{ij} + \rho v_j v_i) = \frac{\partial f_i}{\partial x_i} \quad (4)$$

在能量守恒和小扰动的情况下, 进一步可以得到热声方程[12]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}(\tau_{ij} - \rho v_j v_i) + \frac{\partial f_i}{\partial x_i} + \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\rho - \frac{p}{c_0^2} \right) \quad (5)$$

式中: c_0 为常压下的声速。方程右边第一项的二阶导数部分表示流动噪声源, 第二项的一阶导数部分表示强加在流体上的力所产生的声源, 第三项主要是不稳定燃烧声源, 同压力扰动、密度变化和声速有关。

假设燃烧室内流体为理想介质, 声波传播时是绝热过程, 声压远小于静压, 流体密度增量远小于静态密度, 不考虑声源项时, 方程(5)就简化成声波波动方程

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

该式反映了声压随空间和时间变化的关系, 是时间 t 的二阶导数。如果要考虑三维声波波动, 可以根据矢量代数直接从上式得到

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

式中: ∇ 是拉普拉斯算子。

2.2. 声-振耦合理论

在做声-振耦合计算时, 必须综合考虑声场的波动方程和结构的动力学方程。因此, 声场波动有限元

方程中需要增加结构对声场的作用, 可以表示成

$$M_F \ddot{P} + C_F \dot{P} + K_F P = F_F - \rho R^T \ddot{U} \quad (8)$$

其中, M_F 为流体等效质量矩阵; C_F 为流体等效阻尼矩阵; K_F 为流体等效刚度矩阵; R 为流体和结构的耦合矩阵; U 为单元节点位移; P 为节点声压矩阵。

结构所受载荷包括来自声压力和结构外部两部分, 因此需要将界面处的流体声压载荷加入结构的振动方程, 即

$$M_S \ddot{U} + C_S \dot{U} + K_S U = F_S + RP \quad (9)$$

其中, F_S 为结构所受的外载。

将以上两个方程联立, 就可以得到声场同结构耦合的运动方程, 用矩阵形式可以表示成[13]

$$\begin{bmatrix} M_S & 0 \\ \rho R^T & M_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_S & 0 \\ 0 & C_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_S & -R \\ 0 & K_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_S \\ F_F \end{bmatrix} \quad (10)$$

3. 模拟分析

当甲烷在燃烧室内燃烧时, 燃烧和噪声在流体域内通过空气发生相互作用, 然后又作用在结构上, 反过来, 结构通过流-固耦合作用对声场和燃烧也产生影响, 这就是燃烧室的热-声-振耦合作用。本文在 ANSYS 中采用单向热-声-振耦合的方式对燃烧室进行仿真分析, 先利用 FLUENT 模块进行流体域燃烧运算, 获得结构以外的流体域温度、压力等物理量, 然后将燃烧计算得到的数据传给稳态热分析模块, 以便获得结构上的温度场分布, 最后把得到的温度场和压力场施加到结构上做模态分析。为了进一步了解声学因素对燃烧室结构振动特性的影响, 文中对内部填充气体的燃烧室结构做了有预应力的单向热-声-振耦合模态分析, 也对不考虑声振耦合的燃烧室结构做了热-振模态分析。

3.1. 计算模型

在 SOLIDWORKS 里建立燃烧室结构模型, 如图 1 所示, 从下到上可以分为三段, 长度依次为 322 mm、176 mm、916 mm, 分别负责空气进气(进气段)、点燃及化学反应(中段)、燃烧及排放气体(火焰筒段), 内径 50 mm × 150 mm, 壁厚 4 mm。

在进气段和中段连接部位附近, 包含一个截面为三角形的楔形装置, 即稳焰器, 如图 2 所示, 两侧各有一排直径为 1 mm 的小孔, 甲烷从稳焰器中空管两端通入, 再从两侧小孔喷射而出, 如图中两个短箭头所示, 同下方来的空气在图中两圆圈处混合, 点燃后一起向上流动。

将模型导入 ANSYS 软件, 采用 WORKBENCH 中的六面体 Solid186 单元, 对燃烧室结构进行分块、设定网格, 最终生成的全六面体单元结构如图 3 所示。考虑到火焰筒是壁厚为 4 mm 的不锈钢结构, 因此在壁厚方向上划分了至少 3 层网格。该模型共计有 170 万个节点, 21 万个六面体单元。

对流体域模型进行了分块处理, 在甲烷进气孔附近局部加密, 采用四面体网格, 其它部分均采用六面体网格, 具体网格划分情况如图 4 所示。

3.2. 甲烷燃烧仿真分析

FLUENT 软件包含有丰富的湍流模型, 由于本文使用的流体模型不含有曲面, 整个火焰筒部分是规则的长方体, 因此采用标准的 k 湍流模型来进行燃烧计算。此外, 本文中燃料甲烷和助燃剂空气均是从不同入口进入到燃烧空间点燃, 因此使用基于时均化 N-S 方程的非预混燃烧模型, 求解一个或者两个守恒的标量(混合分数)的输运方程, 然后从预测的混合分数分布推导出每一个组分的浓度。

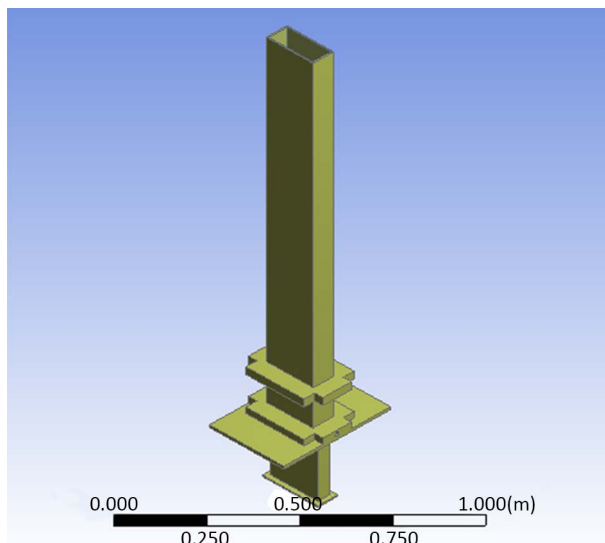


Figure 1. Model of combustion chamber structure
图 1. 燃烧室结构模型

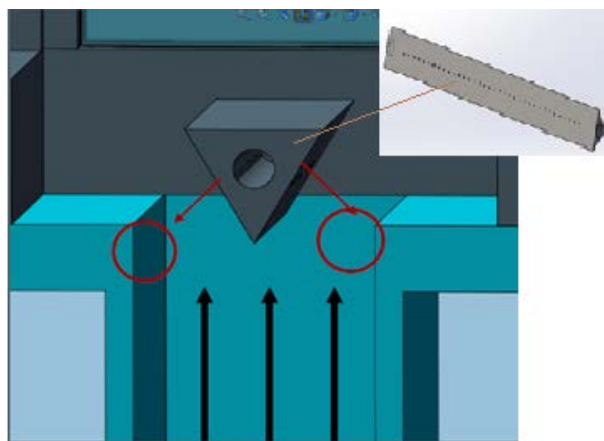


Figure 2. Structure of methane and air mixing
图 2. 甲烷同空气混合处结构

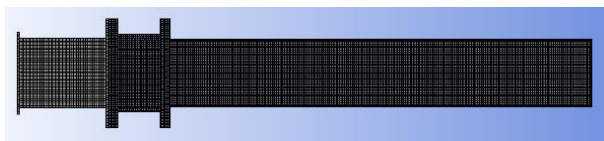


Figure 3. FEM grids of combustion chamber
图 3. 燃烧室结构有限元网格划分

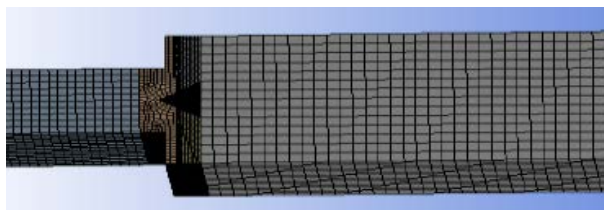


Figure 4. FEM grids of fluid field
图 4. 流体域有限元网格划分

甲烷燃烧的化学方程式如下：



可以看出，1 摩尔甲烷(16 g)燃烧需要消耗摩尔氧气(64 g)，生成 1 摩尔二氧化碳和 2 摩尔水并且释放 890.31 千焦耳能量。因此，可以计算出功率为 60 KW 的工况下，需要每秒燃烧的甲烷质量为 1.0783 g。当甲烷与空气恰好完全燃烧即当量比为 1 时，每秒燃烧所需空气的质量为 18.7530 g。

本文以当量比为 0.6 时的贫燃燃烧工况为例进行计算，即供给 40%过量空气，甲烷和空气进口所需的流量参数经过计算如表 1 所示。

当燃烧开始后，甲烷的质量分数含量会随着时间发生变化，从图 5 可以看到，甲烷从喷射孔喷射而出，刚开始时基本上集中在稳焰器开口处下方。随着空气从下端不断涌入，甲烷在空气冲击和携带下一边燃烧一边向上运动。

Table 1. Flow parameters of methane and air inlets under power 60 KW and equivalence ratio 0.6

表 1. 功率 60 KW 当量比 0.6 时甲烷和空气进口流量参数

| 质量流率(g/s) | 摩尔体积参数(mol/L) | 体积流率(L/s) |
|-----------|---------------|-----------|
| 1.0783 | 24.5 | 1.6512 |
| 26.2542 | 24.5 | 22.1803 |

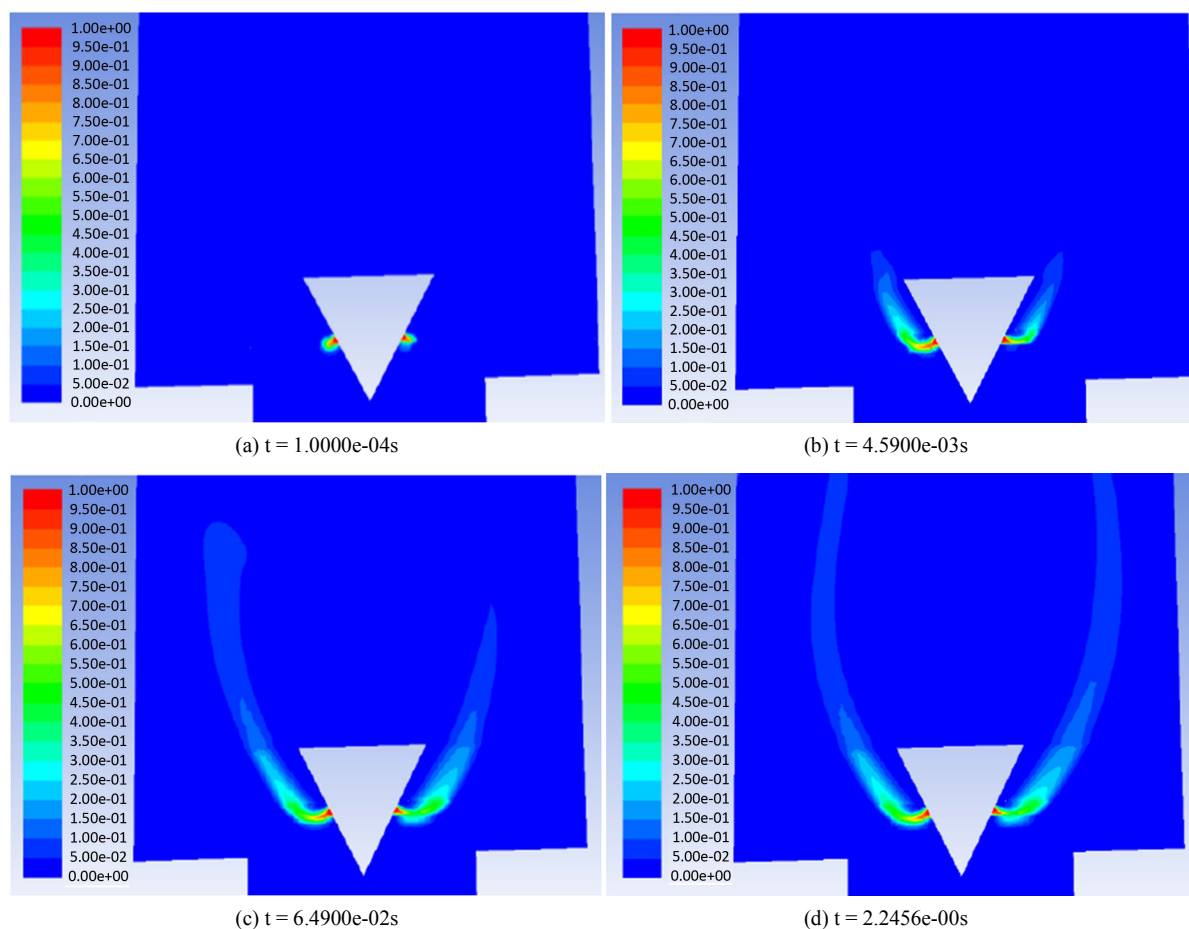


Figure 5. Change of methane mass percentage with time

图 5. 甲烷质量分数随时间的变化

当整个燃烧逐渐趋于稳定时，考虑重力和燃烧辐射的影响，可以得到燃烧室两个中心截面和流固耦合面的总温云图如图 6 所示。从水平截面可以看出，温度较高的大片区域出现在左右两侧，即甲烷进口附近，这主要是由于甲烷从稳焰器两端朝着中央喷入，两端浓度较高，中间浓度低。此外，这种浓度分布特点也使得甲烷同自下而上喷入的空气混合燃烧后，两端的高温区域向上蔓延的范围较大，而中间的高温区域向上蔓延范围较小。从竖直截面可以看出，靠近稳焰器的区域温度较高，因为甲烷从稳焰器喷出，该区域浓度较高。

甲烷燃烧时不仅会产生热量，使燃烧室结构和内部气体温度升高，内部还会产生高压和燃烧噪声，模拟计算得到的总压和声场强度云图分别如图 7 和图 8 所示。从图 7 可以看出，在稳焰器附近的很小一片区域里，压力最大，因为甲烷和空气都以一定的质量流率进入燃烧室，主要在此处混合进而燃烧，随着距离稳焰器越来越远，压力也随之减小。从图 8 可以看出，稳焰器及其上部邻近区域的声场强度较大，

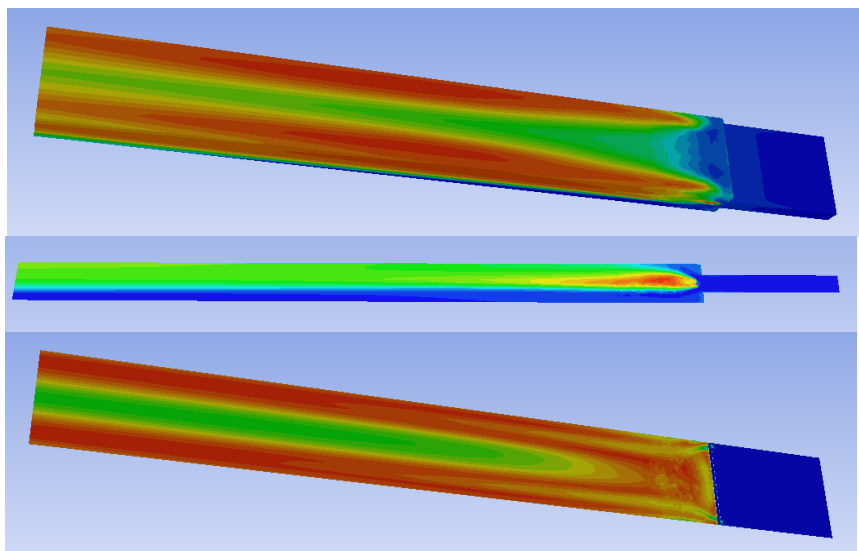


Figure 6. Contour of total temperature
图 6. 总温云图

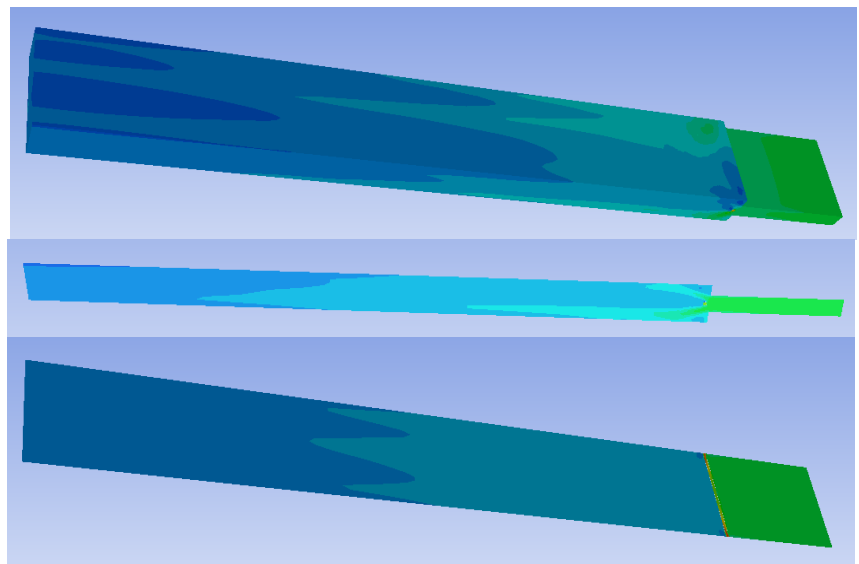


Figure 7. Contour of total pressure
图 7. 总压云图

因为燃烧主要发生在这里，燃烧过程中不可避免地会产生燃烧噪声。

3.3. 燃烧室模态分析

为了更好地了解燃烧工况下燃烧室结构在高温高压高声强环境下的振动特性，本文利用 ANSYS-WORKBENCH 做了单向热-声-振耦合模态分析。此外，也对结构做了不考虑声-振耦合的热-振模态分析，并将两组结果进行了对比，以便更清楚地掌握内部气体对结构振动的影响。

将 3.2 节中利用 FLUENT 模块得到的燃烧计算结果，包括温度场和压力场，施加到燃烧室结构上，做预应力模态分析。由于温度变化不仅会使结构产生热预应力，而且对结构和气体的材料特性也有影响，因此，在做模态分析时，必须同时考虑热预应力和材料特性随温度的变化。本文中燃烧室结构采用不锈钢 310 S，其杨氏模量和泊松比特性随温度的变化分别如图 9 和图 10 所示[14]。在滤除刚体模态后，选

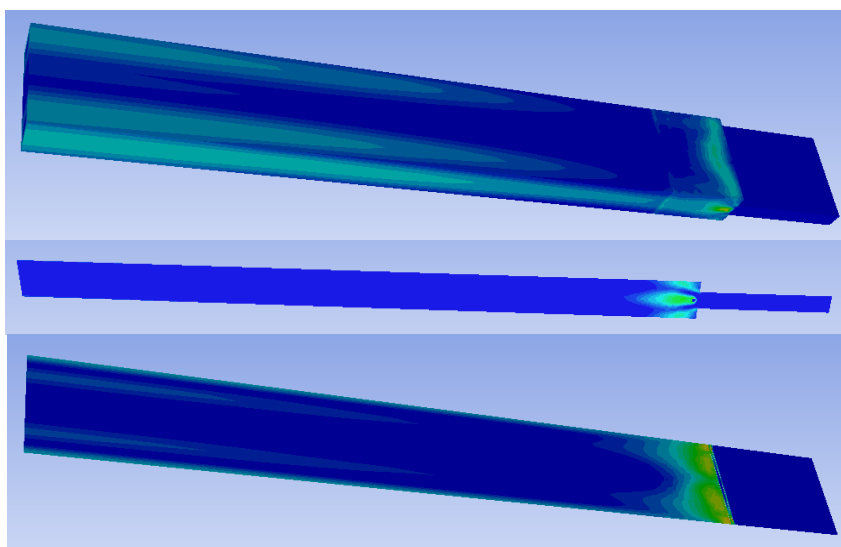


Figure 8. Contour of acoustic strength

图 8. 声场强度云图

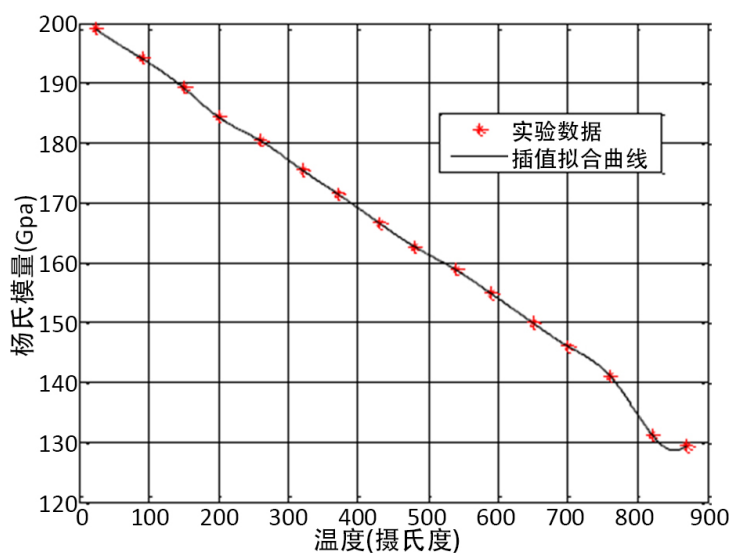


Figure 9. Change of young's modulus of stainless steel 310S with temperature

图 9. 不锈钢 310S 杨氏模量随温度的变化

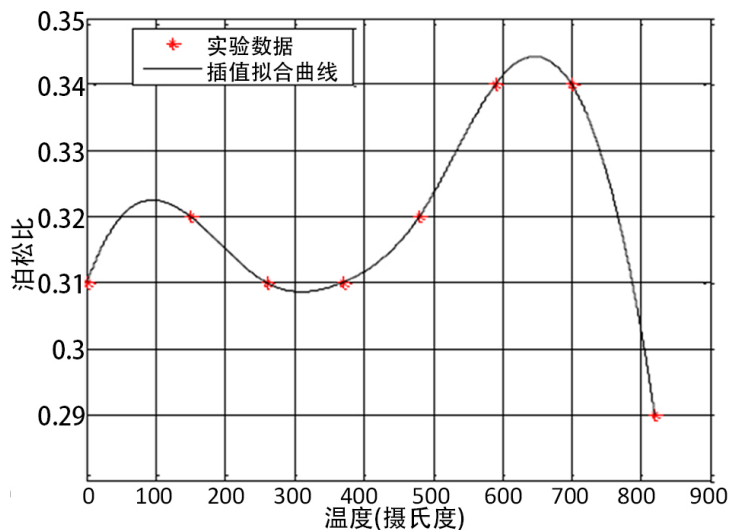
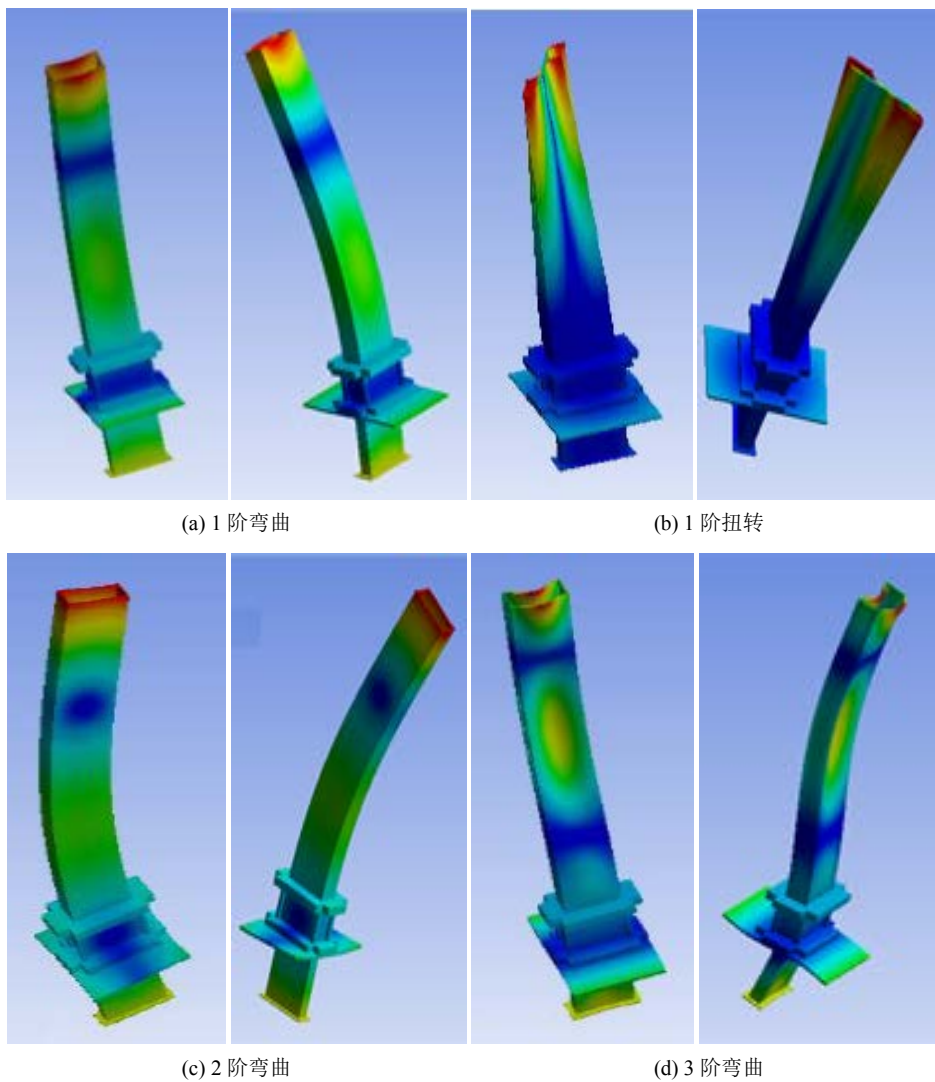


Figure 10. Change of poisson's ratio of stainless steel 310S with temperature
图 10. 不锈钢 310S 泊松比随温度的变化



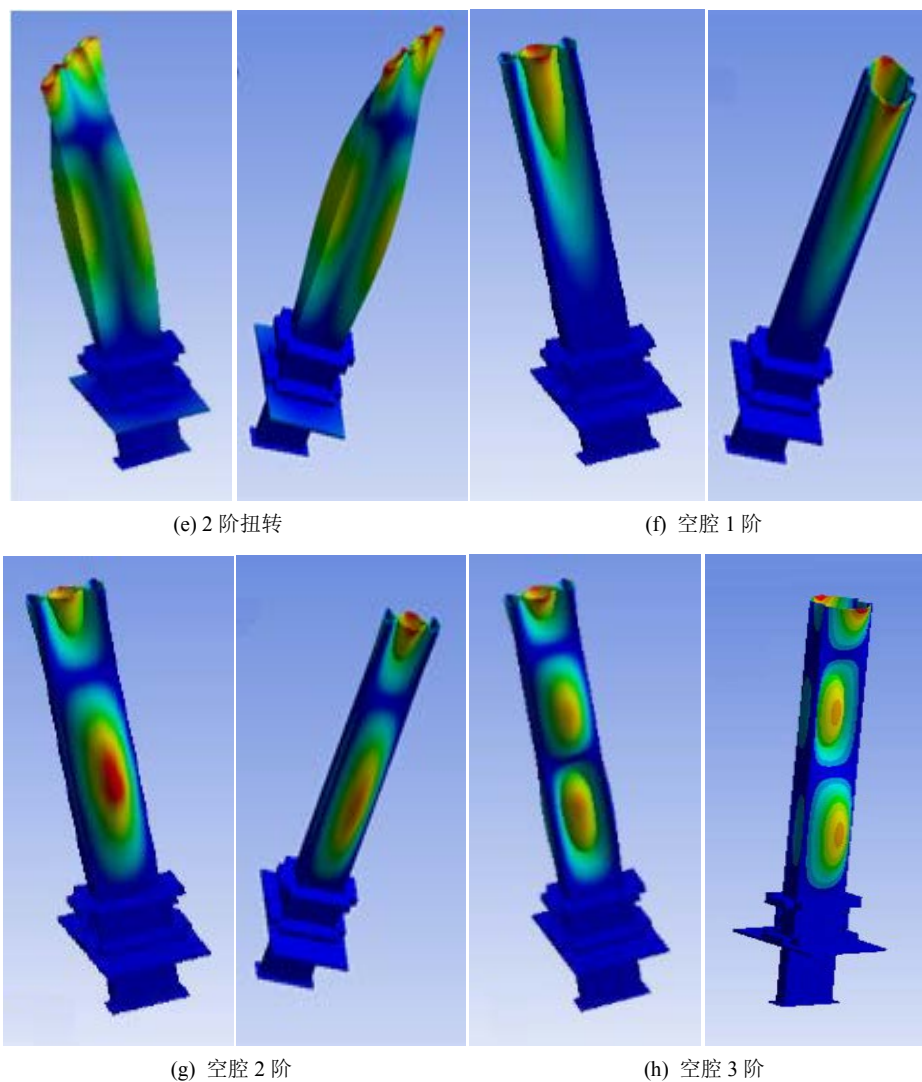


Figure 11. The first 8 mode shapes of combustion chamber (left: thermos-acoustic-vibration; right: thermos-vibration)

图 11. 燃烧室前 8 阶模态振型(左: 热-声-振耦合; 右: 热-振耦合)

Table 2. System resulting data of standard experiment

表 2. 单向热-声-振耦合和热-振耦合下燃烧室结构模态频率对比

| 模态频率(Hz) | 1阶弯曲 | 1阶扭转 | 2阶弯曲 | 3阶弯曲 | 2阶扭转 | 空腔1阶 | 空腔2阶 | 空腔3阶 |
|----------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 热-声-振耦合 | 203.32 | 334.52 | 386.93 | 424.3 | 452.89 | 481.1 | 493.59 | 514.92 |
| 热-振耦合 | 213.27 | 337.52 | 407.01 | 434.1 | 462.27 | 498.23 | 511.2 | 536.83 |

取 8 阶模态频率如表 2 所示, 模态振型如图 11 所示。

从表 2 和图 11 可以看出, 低阶模态主要包含了弯曲模态和扭转模态, 而空腔模态在较高频率才出现。对比单向热-声-振耦合和热-振耦合模态频率可以发现, 声-振耦合的影响造成空腔 3 阶频率减小了大约 22 Hz, 其它阶次的频率也有不同程度的减小, 一方面可能是由于内部气体的附加质量影响所致, 另一方面内部气体对总体刚度也会产生一定影响, 导致总体刚度减小。因此, 为了获得结构在工作状态下更准确

的振动特性, 应该考虑声-振耦合的影响。此外, 尽管两种情况下得到的模态频率不同, 但模态振型并没有明显差别。

4. 结论

本文以单向耦合的方式首先对甲烷气体同空气非预混燃烧做了模拟计算, 然后将燃烧得到的数据作用在燃烧室结构上做了热-声-振耦合特性分析, 为了更好地了解声-振耦合的影响, 也同不考虑声-振耦合作用的热-振耦合模态分析结果进行了对比, 可以得到以下一些结论:

- (1) 甲烷浓度较高的燃烧区域温度较高, 而且高温蔓延的区域也较大。
- (2) 甲烷同空气混合燃烧的区域压力最大, 随着距离稳焰器越来越远, 压力也随之减小。
- (3) 甲烷同空气混合燃烧时会产生燃烧噪声, 较大声场强度发生在主燃烧区域。
- (4) 弯曲模态和扭转模态在较低的频率就开始出现, 而空腔模态在较高频率才出现。
- (5) 热-声-振耦合比不考虑声-振耦合的热-振耦合得到的模态频率更小, 这表明内部气体对结构的振动特性有一定影响。
- (6) 无论是否考虑声-振耦合, 两种情况下得到的相对应模态振型并没有明显差别。

基金项目

国家自然科学基金(61179056); 航空科学基金(2013ZB52029); 民航科研基金(MHKYQN2016-04)。

参考文献 (References)

- [1] Prakash, A., Diwakar, P., Lin, D., Deane, P., Liu, Y.Q. and Jaouhari, M. (2015) Acoustic Vibration Induced Fatigue in Pipe Joints. *Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2015*, Boston, Massachusetts, USA, 19-23 July 2015. <https://doi.org/10.1115/pvp2015-45799>
- [2] 张冬梅. 某型航空发动机环形燃烧室火焰筒声学模态分析[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2008, 25(4): 22-25.
- [3] 尹帮辉, 艾延廷, 陈彦斌, 李川. 航空发动机环形燃烧室模型内部声场特性分析[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2009, 26(5): 27-30.
- [4] 艾延廷, 王昌旭, 郭晓玲. 燃烧室结构声耦合特性研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(15): 2008-2012.
- [5] 郭晓玲, 艾延廷, 姜苏, 李松金. 燃烧室模型倒角对结构声影响的数值计算[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2012, 29(3): 10-15.
- [6] 郭晓玲, 艾延廷, 张婷婷. 燃烧室模型薄壁结构的声固耦合有限元分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2013, 30(1): 20-25.
- [7] 赵银燕, 刘旭, 秦卫阳. 航空飞行器发动机燃烧室声振耦合分析[J]. 计算机仿真, 2014, 31(11): 108-112.
- [8] 李彦斌, 张鹏, 邹元杰, 吴邵庆, 费庆国. 随机基础激励下承力筒—蒙皮结构的声—固耦合分析[J]. 宇航学报, 2015, 36(2): 236-242.
- [9] 沙云东, 魏静, 高志军. 热声载荷作用下薄壁结构的非线性响应特性[J]. 航空学报, 2013, 34(6): 1336-1346.
- [10] Altunlu, A.C., Shahi, M., Pozarlik, A., van der Hoogt, P.J.M., Kok, J.B.W. and de Boer, A. (2012) Fluid-Structure Interaction on the Combustion Instability. *ICSV19*, Vilnius, Lithuania, 8-12 July 2012.
- [11] Pozarlik, A.K. and Kok, J.B. (2012) Experimental Investigation and Numerical Prediction of Thermo-acoustic Instabilities and Associated Liner Vibrations Induced by Combustion Process in Gas Turbines. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, 9-12 January 2012, 1-17.
- [12] Shahi, M. (2014) Modeling of Complex Physics and Combustion Dynamics in a Combustor with a Partially Premixed Turbulent Flame. PhD Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- [13] Altunlu, A.C. (2013) The Analysis of Mechanical Integrity in Gas Turbine Engines Subjected to Combustion Instabilities. PhD Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- [14] 刘军. 基于时变工况的发动机燃烧室热-声-振耦合实验设计研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojav@hanspub.org