基于 PANDA 平台的飞行器脉动压力激励 随机振动响应分析

王柯颖,胡杰,范宣华,牛红攀

(中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621999)

摘要:目的 形成自主再入飞行数值模拟预测技术。方法 采用模态叠加法开展自由结构的多点脉动压力激励随机振动响应分析,基于 PANDA 高性能力学分析平台进行并行实现研究,构建相应的求解模块。针对飞行器再入过程,基于自主研发的软件模块,分析飞行器自由状态的模态特性及其在实测脉动压力载荷下的振动响应,并与商业软件分析结果进行比对。结果 模态振型的误差小于 0.2%, 位移均方根响应云纹分布一致,最大值和最小值的误差分别为 1.93%和 6.14%。结论 验证了相关功能的正确性,证明 PANDA 平台可以用于实际工程的结构分析中。

关键词: PANDA 平台; 自由状态; 多点脉动压力激励; 随机振动; 有限元分析 中图分类号: TJ011; TP311 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)03-0038-07 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.03.007

Random Vibration Response Analysis of Aircraft with Pulsating Pressure Excitation Based on PANDA Platform

WANG Ke-ying, HU jie, FAN Xuan-hua, NIU Hong-pan

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: In order to form autonomous and contrallable numerical simulation and prediction technology of reentry flight, in this paper, based on self-developed PANDA parallel computing platform, the modal superposition method is used to by the algorithm design of the random vibration response of free structure which should be implemented under multi-point pulsating pressure excitation. The algorithm design and parallel implementation are carried out, and the corresponding solving module is constructed. For the reentry process of the aircraft, based on the self-developed software module, the modal characteristics of the aircraft under free state and its vibration response under the measured pulsating pressure load were analyzed. The results were compared with software commercial analysis to verify the related software. The error of modal shapes is less than 0.2%, the distribution of mean square root deform response is consistant, and the error of maximum and minimum response is 1.93% and 6.14% respectively. The correctness of the module and the usability of the PANDA platform are verified in the actual engineering structure analysis.

KEY WORDS: PANDA platform; free state; multi-point pulsating pressure excitation; random vibration; finite element analysis

收稿日期: 2021-02-03; 修订日期: 2021-02-13

Received: 2021-02-03; Revised: 2021-02-13

作者简介:王柯颖(1985-),男,工程师,主要研究方向为结构动力学数值模拟。

Biography: WANG Ke-ying (1985-), Male, Engineer, Research focus: numerical simulation of structural dynamics.

引文格式:王柯颖,胡杰,范宣华,等.基于 PANDA 平台的飞行器脉动压力激励随机振动响应分析[J].装备环境工程,2021,18(3): 038-044.

WANG Ke-ying, HU jie, FAN Xuan-hua, et al. Random vibration response analysis of aircraft with pulsating pressure excitation based on PANDA platform[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(3): 038-044.

飞行器在再入大气层时,外表面的流场将诱导复 杂的脉动压力作用,脉动压力是飞行器产生随机振动 的主要载荷源。脉动压力可以通过风洞试验、飞行试 验或流体分析计算等获取。得到脉动压力分布后的结 构动力学计算仍具有一定难度:首先再入飞行器处于 自由飞行状态,自由状态下的动力学分析面临刚度矩 阵奇异问题;其次,再入飞行器不同部位所承受的脉 动压力各不相同,属于多点相关激励问题。以脉动压 力为载荷条件,建立面载荷、自由体结构振动响应数 值模拟预测技术,对形成较为全面的再入飞行力热环 境预测能力有重要意义。

在航空航天领域,众多的商业软件被用来进行结构力学分析,但使用商业软件面临着分析自由度受限等问题。目前国内正在积极开发拥有自主知识产权的高性能力学分析软件,比如 PANDA^[1]、PHG^[2]、PFEPG^[3]等。其中 PANDA (Platform for Parallel Adaptive Nonlinear Dynamic-and-static Analysis)是中国工程物理研究院研发的大规模有限元并行分析软件平台,具备千万自由度、上千 CPU 核应用程序开发所需的并行支撑环境能力。在 PANDA 平台过往的研究中,对随机振动分析功能的研究主要集中于约束结构和受基础激励的情况^[4-7]。

文中针对自由结构受脉动压力激励的情况,介绍 相关的理论,并基于 PANDA 平台进行软件实现。利 用自研软件对自由状态的飞行器结构受到多个实测 脉动压力激励的情况进行分析,与某商业有限元软件 对比结果,对 PANDA 平台针对自由体的脉动压力激 励的随机振动响应分析功能进行测试和验证。

1 自由体脉动压力随机振动相关理论

1.1 自由体模态分析

对于自由体结构,模态分析形成的总体矩阵存在 奇异性,影响计算结果。为消除刚度矩阵的奇异性, 可以采用谱变换技术进行处理,模态分析对应的广义 特征值问题为:

$$\boldsymbol{K}\boldsymbol{x} = \lambda \boldsymbol{M}\boldsymbol{x} \tag{1}$$

式中: x 为广义特征向量; λ 为特征值。对刚度 矩阵 K 进行移位变换,式(1)可以变换为:

$$(\mathbf{K} + \sigma \mathbf{M})\mathbf{x} = (\lambda + \sigma)\mathbf{M}\mathbf{x}$$
(2)

式中: σ 为谱变换移位值。通过式(2)的谱变换, 原来的刚度矩阵 K 变为 $K+\sigma M$,相当于在原来刚度矩 阵基础上对各个自由度施加了 1 个约束,通过选取合 适的移位值消除刚度矩阵本身的奇异性,从而便于求 解。对比式(2)和式(1)可以发现,谱变换后,方程的 特征向量并未改变,特征值由原来的 λ 变成了 $\sigma+\lambda$ 。 在具体实现中,只需要将原来的刚度矩阵算子 K 替换 为 $K+\sigma M$ 即可。求解后的模态振型保持不变,而模 态频率在原来基础上统一减去 σ ,即为原来自由体所 对应的模态频率。

1.2 随机振动分析

式中: C表示阻尼矩阵; u表示节点位移向量; f表示脉动压力的载荷离散向量。式(3)中的载荷向量 f由脉动压力载荷离散而来,这涉及到面载荷到节点 载荷的等效处理。压力载荷在单元上通过数值积分转 化成等效的节点载荷,一般可以表示为;

$$\boldsymbol{P}_{s}^{e} = \int_{e} \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{T} \mathrm{d} \boldsymbol{S} \tag{4}$$

式中: **P**^e_s为单元面载荷的等效节点载荷; S^e为 积分区域单元上的面; N为单元形函数矩; T 为面载 荷向量。将各单元上的等效节点向量组合起来, 就形 成了右端项 **f**。对于含有 r 个压力激励的结果, **f** 可 以表示为幅值与载荷方向向量的乘积:

$$\boldsymbol{f} = \sum_{i=1}^{r} p_i \boldsymbol{f}_i \tag{5}$$

功率谱密度与脉动压力之间的关系为:

$$S_{lm}(\omega) = S_{p_l p_m}(\omega) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} p_l(\omega) p_m^*(\omega)$$
(6)

式(6)中,当 *l=m* 时,对应自谱,当 *l≠m* 时,对 应互谱。采用模态叠加法进行解耦,将位移转换到模 态坐标系下:

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\eta} = \sum_{j=1}^{M} \boldsymbol{\phi}_{j} \boldsymbol{\eta}_{j} \tag{7}$$

式中: ϕ_j 为第*j*阶模态振型; η_j 为模态坐标。对 于第*j*个模态坐标,有:

$$\ddot{\eta}_{j} + 2\omega_{j}\xi_{j}\dot{\eta}_{j} + \omega_{j}^{2}\eta_{j} = \sum_{l=1}^{N}\gamma_{lj}p_{l} \text{ with } \gamma_{lj} = \phi_{j}^{\mathrm{T}}f_{l} \qquad (8)$$

式中: *ŋ*_j为模态参与系数,下标 *l* 和 *j* 分别对应 压力激励和模态阶数。式(8)在频域内的解为:

$$\Pi_{j}(\omega) = H_{j}(\omega) (\sum_{l=1}^{N} \gamma_{lj} p_{l}(\omega)) \text{ with } H_{j}(\omega) =$$

$$1$$
(9)

 $\overline{\omega_i^2 - \omega^2 + i(2\xi_i \omega \omega_i)}$

式中: *H_j*(ω)为频响函数。根据模态功率谱的定 义,位移的自功率谱密度表达式为:

$$S_k(\omega) = \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \phi_{ik} \phi_{jk} \gamma_{li} \gamma_{mj} H_i(\omega) H_j^*(\omega) S_{lm}(\omega)$$
(10)

式中: *k* 表示自由度。速度、加速度功率谱密度 和位移功率谱密度之间的关系为:

$$S_{\dot{x}_k \dot{x}_k} = \omega^2 S_{x_k x_k}$$

$$S_{\ddot{x}_k \ddot{x}_k} = \omega^4 S_{x_k x_k}$$
(11)

第 k 个自由度对应的位移(或速度、加速度)均 方根值可以表示为:

$$\sigma_{k} = \operatorname{sqrt}(\int_{\omega_{1}}^{\omega_{2}} S_{k}(\omega) d\omega) \approx$$

$$\operatorname{sqrt}(\sum (S_{k}(\omega + \Delta \omega) + S_{k}(\omega)) \Delta \omega / 2)$$
(12)

2 并行实现简介

PANDA 平台基于 JAUMIN 框架^[8-9]数据结构研 发有限元分析平台,目前具有静力学、模态和振动、 冲击动力学等多个并行分析软件,自由体脉动压力激 励随机振动响应分析功能是其中的一个求解模块。 PANDA 平台的架构如图 1 所示。自由体脉动压力激 励随机振动响应分析由多个基本功能组合形成,如图 2 所示。





从图 2 中可以看到,模态分析是响应分析的基础,该阶段给出结构的模态振型和固有频率。谱线管理器解析输入激励,包括自功率谱密度曲线(实数)和互功率谱密度曲线(复数)。对于每个脉动压力激励,都会计算对应的等效节点载荷向量,并利用其与模态振型来计算模态参与系数。指定节点自由度自功率谱密度和计算全场的均方根响应的计算,需要用到模态参与系数、频响函数、各阶模态振型以及输入的功率谱密度。计算结果以响应曲线和云纹图的形式输出。

以上过程中的并行基于单元和自由度展开,在结

构的单元计算和矩阵组装、总体方程组求解、模态参与系数计算、全场均方根响应计算等阶段有很好的体现。其中总体特征值方程组的求解依靠集成的 Krylov-Schur 算法和 Jacobi-Davidson 算法^[10-11]完成。

以下针对飞行器算例,开展多点脉动压力载荷作 用下的功率谱密度响应以及均方根响应计算和对比, 对研发模块的正确性进行验证和展示。

3 飞行器响应分析

3.1 模型介绍

飞行器离散后的有限元模型如图 3 所示,飞行器 处于自由状态,不施加任何约束。PANDA 和商业软 件中都采用六面体实体单元进行网格划分,网格单元 保持一致。选取其底部某点为关注点,用五角星表示。 结构承受脉动压力的分布情况,从飞行器前段开始, 将脉动压力分成 3 段,每段分为上部和下部,共计 6 个不同的区域,如图 4 所示。



图 3 飞行器有限元模型和关注点 Fig.3 FE model of aircraft ant the foucs point



图 4 飞行器所受脉动压 Fig.4 The pressure on the aircraft

飞行器表面 6 个不同区域受到的脉动压力功率 谱密度(PSD)曲线如图 5 所示。

3.2 模态分析

计算结构前 2000 Hz 的固有频率, PANDA 和商

业软件的对比结果如图 6 所示。从图 6 中可以看到, 2000 Hz 内共有 89 阶模态, PANDA 与商业软件的结 果都吻合得很好。前 6 阶是刚体模态,固有频率为 0, 脉动压力随机振动分析只采用从第 7 阶开始的弹性 模态。



Fig.5 The PSD on area of different regions

PANDA 与商业软件计算得到的模态振型也是一 致的,这里列出前5阶弹性模态振型的对比情况,如 图 7—11 所示。

从图 7-11 中可以看到, PANDA 与商业软件给

出的前 5 阶弹性模态在云纹分布上是一致的,各阶模态的最大值的差异也小于 0.2%。这说明了 PANDA 平台模态频率分析功能的正确性。



Fig.7 The seventh order mode deform contour of six DOFs platform: a) PANDA; b) business software

3.3 响应分析

在 6 个区域不同脉动压力激励的作用下, 计算结构的位移响应。取结构前 2000 Hz 内的弹性模态进行 叠加, 各阶模态的阻尼比设为常值 0.015。分析关注 点 3 个空间方向的位移响应功率谱密度曲线, 并与商 业软件结果进行比较, 如图 12 所示。



图 8 结构第 8 阶模态振型

Fig.8 The eighth order mode deform contour of six DOFs platfrom: a) PANDA; b) business software



图 9 结构第 9 阶模态振型

Fig.9 The ninth order mode deform contour of six DOFs platfrom: a) PANDA; b) business software



图 10 结构第 10 阶模态振型

Fig.10 The tenth order mode deform contour of six DOFs platfrom: a) PANDA; b)business software



图 11 结构第 11 阶模态振型

Fig.11 The eleventh order mode deform contour of six DOFs platfrom: a) PANDA; b) business software





从图 12 中可以看到,对于关注点的位移功率谱 响应曲线,PANDA 平台和商业有限元软件的计算结 果是基本一致的。由于频率离散方法的不同,计算结 果中频率点的密度不一样,商业软件的结果中频率点 更密集一些,特别是在小于 50 Hz 的低频阶段。

PANDA 平台和商业软件计算的结构位移均方根 响应对比如图 13 所示。可以看出,在云纹分布上, PANDA 平台与商业软件的结果是完全一致的。 PANDA 平台和商业软件给出的最大值和最小值的误 差分别为 1.93%和 6.14%。这也说明了 PANDA 平台自 由体脉动压力激励随机振动响应分析功能的正确性。



Fig.13 Cloud image comparison of displacement response: a) PANDA; b) business software

4 结论

简要介绍了 PANDA 平台脉动压力激励随机振动 响应分析相关的理论公式和平台实现。针对无约束的 简化飞行器模型,在 PANDA 平台实现了结构模态分 析以及脉动压力作用下的随机振动响应分析,开展了 与商业软件的对比测试。结果表明:

1)在模态分析中,前 2000 Hz 的模态频率分析 结果,PANDA 与商业软件的结果完全一致。前 5 阶 弹性模态的模态振型云纹分布结果也一致,振型最大 值的差别小于 0.2%。

2)在脉动压力随机振动分析中,关注点在 3 个空间方向上的位移响应曲线,PANDA 与商业软件 的结果基本一致;结构的位移均方根响应云纹分布一 致,最大值和最小值的误差分别为 1.93%和 6.14%。

通过对简化飞行器结构开展的对比测试,验证了 PANDA 平台相关功能的正确性,并证明其对实际工 程结构的可用性。

参考文献:

[1] 范宣华. 基于 PANDA 框架的大规模有限元模态分析并

行计算及应用[D]. 北京: 北京大学, 2013.

FAN Xuan-hua. Parallel computation and applications of large-scale finite element modal analysis based on panda framework[D]. Beijing: Peking University, 2013.

- [2] 成杰,张林波. 三维结构分析并行自适应有限元软件 PHG-Solid[J]. 计算机科学, 2012, 39(5): 278-281.
 CHENG Jie, ZHANG Lin-bo. PHG-solid: A parallel adaptive FEM software for 3D structural analysis[J].
 Computer Science, 2012, 39(5): 278-281.
- [3] 梁国平. 有限元语言[M]. 北京: 科学出版社, 2009.LIANG Guo-ping. Finite element programming[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [4] 范宣华,肖世富,陈璞,等. 大规模结构动力学并行计 算与软件研发进展[J].力学季刊, 2016, 3(1): 421-432.
 FAN Xuan-hua, XIAO Shi-fu, CHEN Pu, et al. Advances in the parallel computation and software development of large-scale structural dynamics[J]. Chinese quarterly of mechanics, 2016, 3(1): 421-432.
- [5] 陈红永,范宣华,王柯颖,等.基于大规模并行的飞行器动力学特性仿真[J].系统仿真学报,2015,27(8):1715-1719.
 CHEN Hong-yong, FAN Xuan-hua, WANG Ke-ying, et al. Research dynamic characteristics of hypersonic vehicle based on large scale parallel simulation[J]. Journal of system simulation, 2015, 27(8): 1715-1719.
- [6] 王柯颖, 范宣华, 陈学前, 等. 基于 PANDA 平台的光 机部件随机振动响应分析[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(1): 011021-1-011021-8.

WANG Ke-ying, FAN Xuan-hua, CHEN Xue-qian, et al.

Random vibration response analysis of Shenguang laser facility component based on PANDA platform[J]. High power laser and partical beams, 2020, 32(1): 011021-1-011021-8.

- [7] 范宣华,于晨阳,王柯颖,等.大规模单点基础激励随 机振动分析及并行计算[J].重庆理工大学学报(自然科 学), 2017, 31(10): 56-61.
 FAN Xuan-hua, YU Chen-yang, WANG Ke-ying, et al. Parallel computation of large-scale random vibration analysis under single-point motion-based excitation[J]. Journal of Chongqing University of Technology (natural science). 2017, 31(10): 56-61.
- [8] LIU Q K, Zhao W B, Cheng J, et al. A programming framework for large scale numerical simulations on unstructured mesh[C]// IEEE 2nd International Conference on High Performance and Smart Computing. New York: IEEE, 2016.
- [9] LIU Qing-kai, MO Ze-yao, ZHANG Ai-qing, et al. JAUMIN: A programming framework for large-scale numerical simulation on unstructured meshes[J]. CCF transactions on high performance computing, 2019(1): 35-48.
- [10] STEWART G W. A Krylov-Schur algorithm for large eigen-problems[J]. SIAM j matrix anal appl, 2001, 23(3): 601-614.
- [11] DAVIDSON E R. The iterative calculation of a few of the lowest eigenvalues and correspondingeigenvectors of large real symmetric matrices[J]. J Comp Phy, 1975(17): 87-94.