

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.05.06

某航空发动机整体叶盘耦合振动特性分析

孙浩琳, 吴娅辉, 朱振宇

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 通过建立某航空发动机整体叶盘的三维实体模型, 对整体叶盘结构的耦合振动特性进行了固有模态特性分析。根据有限元软件 ANSYS 的计算结果, 绘制了叶片共振转速 Campbell 图, 分析了整体叶盘结构模态振动的基本特性, 得到了整体叶盘节径-频率图, 分析的结果为进一步研究整体叶盘的结构设计优化和避免共振提供了依据。

关键词: 整体叶盘; 耦合振动; 固有模态; 有限元; 共振特性

中图分类号: TB53; V232.3

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)05-0028-03

Coupling Vibration Characteristics Analysis of Holistic Bladed Disk

SUN Haolin, WU Yahui, ZHU Zhenyu

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: A 3-D entity model of aero-engine holistic bladed disk is established and the natural model of vibration is analysed to the coupling vibration characteristics. According to the calculations of the FEA software of ANSYS, we get the resonance speed Campbell figure of the blade, analyse the basic characteristics of structure model vibration and get the pitch-frequency figure of holistic bladed disk. The results supply the reliable assurance for further studies on the structure optimization design and avoidance of resonating of the bladed disk.

Key words: holistic bladed disk; coupling vibration; natural model; finite element; resonance characteristics

0 引言

航空发动机是一种结构复杂的高速旋转机械, 发动机整机振动是全方位周期振动和复杂随机振动的复合, 是多种影响因素共同作用的结果, 这些特性决定了发动机振动测量的复杂性。现代航空发动机叶盘结构的轻量化和高转速, 使得其整体叶盘的结构形式得到了越来越广泛的应用, 因此研究这种整体叶盘耦合振动的分析理论和振动特性, 对于航空发动机结构完整性检测、叶盘振动测量和故障监测具有重要的指导意义。

长期以来, 对于非整体的叶盘结构, 叶片和轮盘之间是采用“榫头”结构进行连接的, 轮盘的刚度很大。叶片进行振动特性分析时, 可将叶片视为根部“固支”的悬臂结构, 应用 Campbell 图对其进行振动设计^[1]。但是对于整体叶盘的结构形式, 轮盘的设计相对于非

整体的叶盘而言, 刚度要求就没有那么大, 叶片和轮盘间的耦合关系较强, 因此对叶片和轮盘进行振动特性分析时, 需将其作为一个整体结构进行分析。但是, 在针对叶片-轮盘整体结构形式进行耦合振动分析以及振动设计、振动评价等方面, 仍然没有成熟、系统的分析理论和设计计算规范, 仍需要对其进行深入、系统的分析研究。

理论上的整体叶盘在结构上具有旋转对称的特点, 可以采用单扇区进行建模、分析计算^[2]。但实际上, 由于制造的精度误差, 加工材料质量分布不均匀以及使用中叶盘的磨损等因素, 轮盘上叶片的几何分布和物理特性会有微小的差异, 这种有差异的结构会导致某些叶片的振动幅值比理论上大得多。

本文主要采用循环对称结构的有限元分析方法, 对整体叶盘结构的分析模型、基本特性以及耦合结构振动等相关问题进行研究。

1 基于有限元模型的耦合振动分析

由于叶片-轮盘结构比较复杂, 直接 ANSYS 中建

收稿日期: 2015-08-24

基金项目: 中国航空工业集团公司技术创新基金(2013F30441R)

作者简介: 孙浩琳(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究发动机叶尖间隙检测与校准。

立某航空发动机典型叶盘结构模型很困难，所以在 Pro/E 三维建模软件中建立叶盘的完整实体模型，然后导入 ANSYS 中，如图 1 所示。

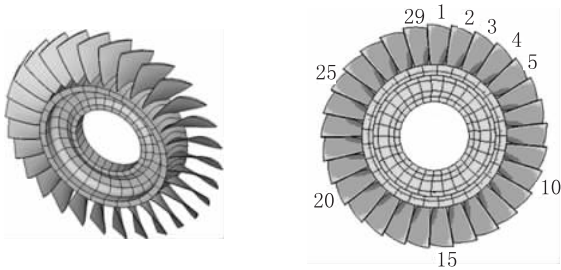


图 1 典型整体叶盘结构

该叶盘上设计有呈圆周分布的 29 个叶片，根据波动分析原理，在对叶片进行有限元分析时，取一个叶片-轮盘扇区作为计算区域，通过对该叶片扇区进行振动模态分析可知，当叶片受到激振力之后，产生的振动主要有弯曲振动、扭转振动和弯扭复合振动这三种形式。对于典型叶盘结构，计算叶片在根部固结的振动频率，得到的叶片共振转速 Campbell 图如图 2 所示。

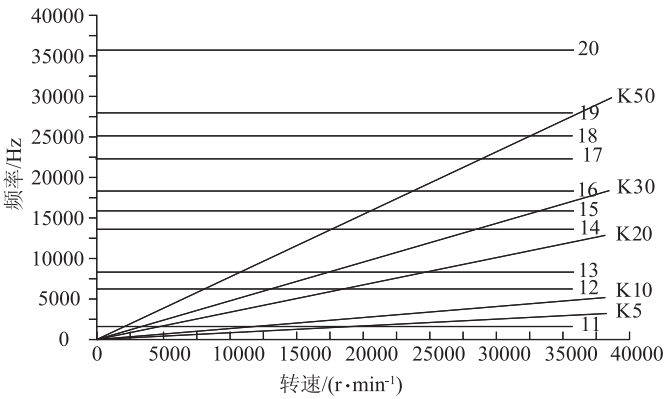
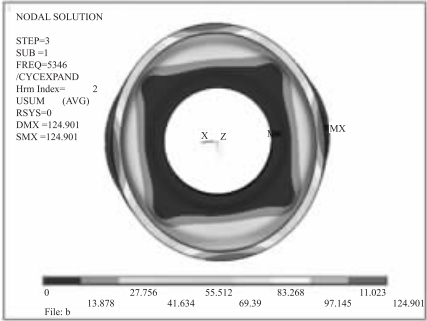


图 2 叶片共振转速 Campbell 图

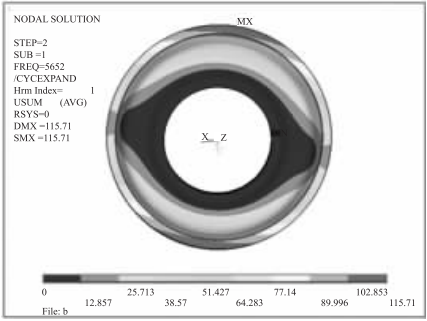
由叶片共振转速图可以看出，叶片共振时的固有频率与工作转速相差较大，叶片工作时出现共振的可能性不大。针对叶片在不同阶数下的弯扭变形，在设计过程中应尽量采取抗弯扭措施，减小因叶片变形造成的性能损坏。

由于轮盘的结构是轴对称的，与叶片相比，轮盘的固有频率要高得多，因此轮盘的高阶模态振动对整体叶盘系统的耦合振动基本没有影响^[3]，所以本文仅列出了轮盘的前几阶振动模态形式，如图 3 所示。由于该轮盘结构的支撑辐板刚度较弱，出现轮盘的零阶弯曲刚度比其二、一阶弯曲刚度大的情况，因此轮盘的模态次序根据固有频率从小到大的顺序为二节径、

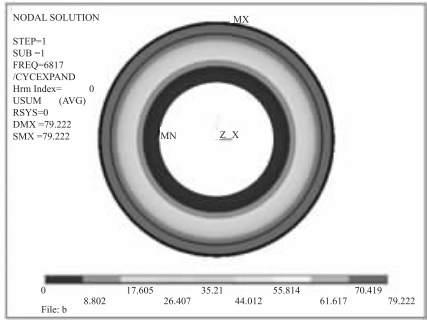
一节径、伞形扭动、三节径等振动形式。



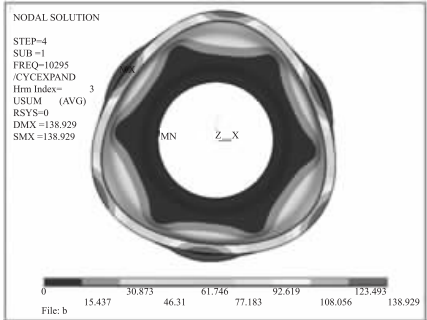
(a) 轮盘二节径模态



(b) 轮盘一节径模态



(c) 轮盘伞形扭动模态



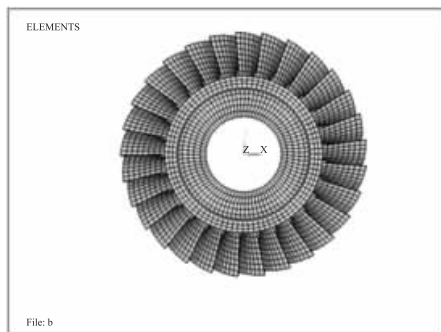
(d) 轮盘三节径模态

图 3 轮盘固有模态

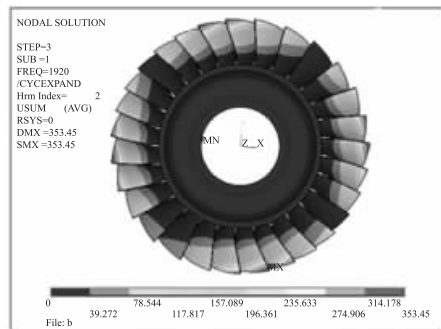
2 整体叶盘固有频率和振型

ANSYS 有限元分析的结果如图 4 所示，不仅叶片和轮盘会出现振动，还出现了盘片的耦合振动，

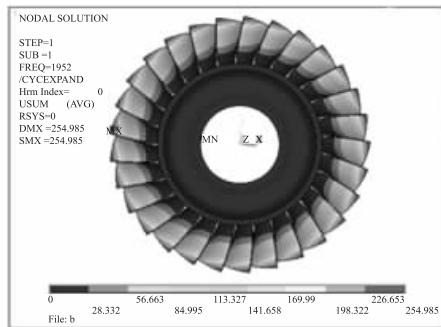
而且呈节径振动形式。由于轮盘影响程度不一样,图4(c)和图4(d)虽然振型一样,但振动频率不一样。



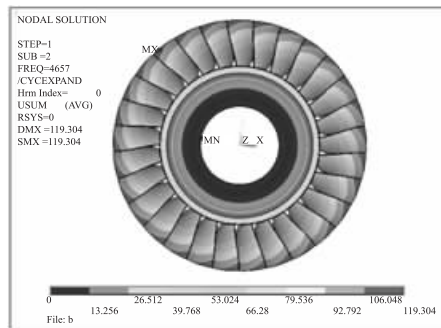
(a) 叶盘整体网格模型



(b) 叶盘二节径振动模式



(c) 叶盘伞形(0节径)振动模式



(d) 叶盘伞形(0节径)振动模式

图4 整体叶盘振动模式

由计算结果可知:

1)整体叶盘耦合振动主要以叶片振动为主,且叶片各阶振动的形式、出现的顺序都与单扇区叶片相同。由于轮盘弹性的影响,频率比单叶片根部固支的同阶要低。如根部固支的单叶片基频为2014.4 Hz,叶盘耦合振动的第一阶弯曲频率仅为1920.4 Hz,如图4(b)所示。所以,轮盘刚度对叶盘结构固有频率有一定影响。

2)整体叶盘结构有着比较明显的节圆和节径振动的特征,节径数与叶盘的扇区数有关,叶盘为周期对称结构,故叶盘节径数是固定的。当叶片受到激振力达到共振时,所有的叶片的振动形式是一样的,在叶轮缘上出现沿圆周均匀分布的节点。由于该整体叶盘有29个叶片,故节点数目从0递增到28。即周期对称结构的节径数是固定的,扇区数决定节径数。

3)靠近节点附近的叶片振幅最小,叶片振幅最大处发生在节点之间,距离节点越远,叶片振幅越大,振动剧烈。共振发生时,可能出现少数叶片因共振而损坏。

3 耦合振动节径-频率图

整体叶盘的振动特性可以用其节径-频率图进行描述。对于该典型叶盘结构,计算整体叶盘结构的振动频率,得到相应的整体叶盘的节径-频率图,如图5所示。

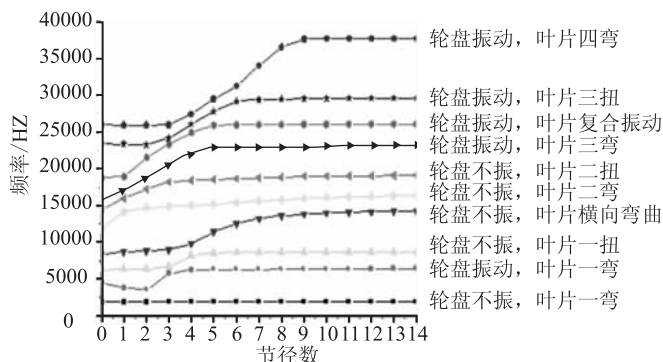


图5 整体叶盘节径-频率图

可以看出,整体叶盘结构振动模式频率主要特点有:①由于各节径均存在叶片的多阶模式频率,因此整体叶盘结构的模式频率更加密集;②轮盘的各节径均会出现一族模式频率,因此密集的整体叶盘结构模式频率呈“族”出现;③叶盘结构振动模式所表现的主

(下转第51页)

表 1 测试结果

定位模式	静态定位精度/m		跟踪灵敏度 /(- dBm)
	水平定位精度 u_H	垂直定位精度 u_U	
BDS	4.08	5.25	158
BDS + GPS	1.63	4.20	161

从表 1 给出的测试结果来看，在北斗 + GPS 联合定位模式下，结果均好于单北斗模式，从侧面反映出双模对定位性能提高的优势^[4]。该结果满足了指标规定要求，反映出国内厂家在软件算法和硬件设计上取得了长足进步，其芯片已接近国际先进水平。

4 总结

随着民用导航的快速发展，消费类市场对于卫星导航芯片发展的基本要求就是在不断提升性能指标的同时追求芯片产品的低功耗、低成本、小尺寸和易集成。将导航射频和基带功能集成(包括低噪放、滤波器和抗干扰在内的元器件和功能)，形成一体化导航芯片，在降低外围物料面积和成本的同时也降低用户应用时的设计难度，是芯片发展的方向之一^[5]。



(上接第 30 页)

要形式包括叶片主导型模态，轮盘主导型模态和叶片轮盘组合主导型模态。

对于叶片主导振型，在节径 - 频率图中可以看到斜线近似水平，叶盘结构以叶片振型位移为主要振动形式；轮盘主导振型则是以轮盘的振动位移为主，随着节径数的增加，轮盘波数增大，节径 - 频率图中出现斜率较大的斜线；而叶片和轮盘同时具有较大模态振动时，叶盘结构振动表现出的形式则是叶片轮盘组合主导振型。

4 共振分析时需要考虑的几个问题

一般来说，对整体叶盘结构进行共振特性分析的方法主要是对叶片和轮盘分别进行共振分析，并从如何减少共振的角度进行叶片和轮盘的振动设计^[3-4]。但根据本文分析，在进行整体叶盘结构的耦合振动分析过程中，需进一步考虑以下因素：①由于整体叶盘结构的模态按节径分“族”，其模态频率呈“带”分布，因此，避开共振问题应是避免与该“族”的各阶模态频率产生共振；②由于模态密集，难以真正避开与所有模态频率产生共振的情况，实际上在很多情况下，可能达不到避开共振的要求，因此主要研究如何避开若干关键阶模态频率的共振问题；③由于叶片与轮盘之间不存在榫接的摩擦阻尼等，整体叶盘结构的阻尼更小，因此研究其结构的共

振特性时需进行更加仔细的分析和试验。

参 考 文 献

[1] Bracy B L, Mims W, Elrod B. Inverted GPS Range for Modernized GPS Field Testing [C] //ION 58th Annual Meeting. Albuquerque, New Mexico: ION, 2002.

[2] 何晓峰. 北斗导航接收终端检测规程[S]. 长沙: 国防科技大学电子科学与工程学院卫星导航研发中心, 2013.

[3] 张钦娟. 北斗二号民用设备测试方法研究[J]. 现代电信科技, 2012, 15(3): 78 - 80.

[4] Timothy M B, Jason W, Michael J C. A High G MEMS - Based Deeply Integrated INS/GPS Guidance Navigation and Contral Flight Management Unit [C] // IEEE/ION PLANS 2006. [s. l.] : IEEE/ION, 2000: 772 - 794.

[5] Brian Weinstein, Dennis Akos, Eric Vinande. Tianxing Chu: GNSS Receiver Evaluation Record and Playback Test Methods [J]. GPS World, 2009, 17: 23 - 26.

5 总结

本文主要采用循环对称结构的有限元分析方法，对整体叶盘结构的分析涉及两个方面的内容：①基于有限元模型的实际叶盘结构耦合振动的固有模态特性分析，包括分析模型、叶片和轮盘的固有模态、整体叶盘结构固有模态特性等，并对典型整体叶盘进行了计算和分析；②在相关分析的基础上，讨论了整体叶盘结构振动模态与共振特性问题等，为实际工作整体叶盘耦合振动的预测与分析提供了依据。

参 考 文 献

[1] 王春洁, 宋顺广, 宗晓. 压气机中叶片轮盘耦合结构振动分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(7): 1065 - 1068.

[2] Lazarus A, Prabel B, Combescure D. A 3D finite element model for the vibration analysis of asymmetric rotating machines [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329 (18): 3780 - 3797.

[3] 范志强, 马枚, 王荣桥. 航空发动机整体叶盘优化设计[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2000, 13(4): 27 - 30.

[4] 李炳涛, 张莉莉, 鲁锐. 基于 ANSYS 的故障涡轮振动性能分析[J]. 机械工程与自动化, 2008(6): 115 - 117.