

文章编号: 1000-8055(2003)01-0130-04

某实际发动机篦齿封严装置振动特性和稳定性分析

李 辉, 李其汉, 晏砺堂

(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 篦齿式封严装置是一种非常有效的非接触密封装置, 在航空燃气涡轮发动机等叶轮机械中得到广泛应用。随着航空发动机性能的提高, 篦齿封严装置的振动故障问题愈发突出, 颤振、声固耦合及振型协调等振动故障发生的可能性越来越大。本文针对某实际航空发动机的篦齿封严装置, 对其进行了振动特性和气弹稳定性分析, 有较强的工程实际意义。

关键词: 航空、航天推进系统; 篦齿封严; 振动; 气动弹性; 稳定性; 阻尼

中图分类号: V 231.92

文献标识码: A

Vibration Character and Aeroelastic Stability Analysis of Real Labyrinth Gas Seals

L I Hui, L I Q i-han, YAN L i-tang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Labyrinth gas seals are commonly used for aeroengines and other machines. But failures, such as sound-machine coupling, vibration mode harmony and aeroelastic flutter, often occur. We analyzed the vibration character and aeroelastic stability of labyrinth gas seals which are used in a real aeroengine. According to the analysis result, we give some useful suggestions.

Key words: aerospace propulsion; labyrinth seals; vibration; aeroelastic; stability; damp

1 篦齿封严装置的基本参数

该篦齿封严装置为一真实结构, 为达到工程实用的效果, 分析采用的结构数据及工作参数均与实际情况相符。该篦齿封严装置为一个带有三个封严齿、两个密封腔的封严结构, 其转动件固定在发动机的高压转子上, 静子件固定在机匣上, 结构形式见图 1。

篦齿封严装置主要由转子件和静子件组成, 除了上面两个实体材料的零部件以外, 在静子件内侧还有由蜂窝材料制成的易磨环, 以防止转子件和静子件之间直接接触发生严重碰摩。转静子

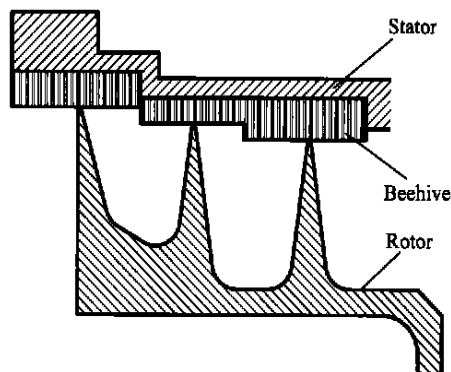


图 1 篦齿封严结构

Fig 1 Structure of the labyrinth seals

收稿日期: 2001- 12- 28; 修订日期: 2002- 04- 05

作者简介: 李辉(1967-), 男, 辽宁抚顺人, 北京航空航天大学动力系博士生, 主要从事发动机强度与振动研究

件的材料为 GH 536, 蜂窝材料的密度、泊松比及弹性模量等参数由测算获得。

2 振动特性分析

为了对篦齿封严装置的声固耦合、振型协调及气动弹性稳定性进行分析, 必须先分析篦齿封严装置的固有振动特性。篦齿封严装置的转静子件在结构上与薄壁回转壳体相似, 根据薄壁回转壳体的振动特性可以得知, 其振动形式主要表现为沿周向的节径型行波振动^[1]。

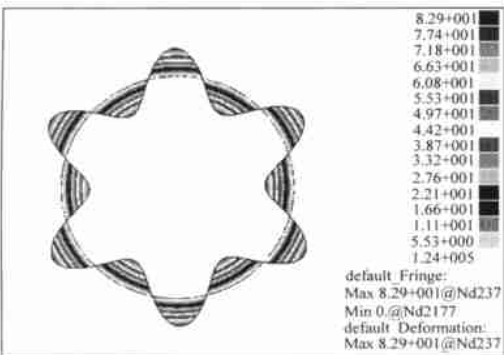


图 2 6 节径模态

Fig 2 V ibration Mode of six ND

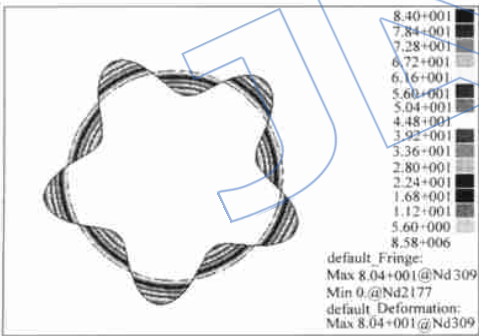


图 3 5 节径模态

Fig 3 V ibration Mode of five ND

本文采用有限元方法对篦齿封严装置的固有振动特性进行了分析, 其典型的转、静子件模态振型见图 2~ 图 3。

3 声固耦合共振及振型协调分析

3.1 声固耦合共振分析

对于发动机机匣、鼓筒及封严篦齿一类的薄壁结构, 声固耦合是一个经常遇到的问题。篦齿式封严装置有一定的排气面积, 这个排气面积通常可以将封严气体周向压力的变化趋势均匀掉, 但当封严件出现节径型振动模态时, 环腔内的气流

也变成周波节径气流, 若在各环腔内出现的周向传播的声波频率与封严件的固有频率相等或相近, 则发生声固耦合现象。

篦齿封严装置封严腔内封严气体周向传播的声波频率可以由(1)式计算:

f_s = \frac{mC}{2\pi r} \tag{1}

其中: m 为周向波数; C 为当地声速; r 为封严半径。

篦齿封严装置的声频共振图见图 4。

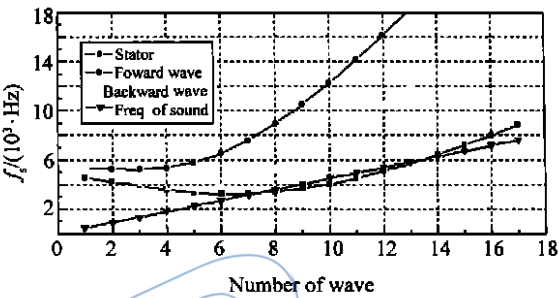


图 4 声固耦合振动

Fig 4 Sound Mechanical vibration coupling

从图 4 中可以看出, 静子件在周向为波数 7 和 13 时, 可能发生声固耦合共振, 应采取相应的减振措施, 如加装蜂窝、阻尼器等, 在实际结构中使用的是蜂窝。

3.2 振型协调分析

由于篦齿封严装置的转子件和静子件的振动形式都是以沿周向的节径型行波振动形式为主, 因此静子件和转子件在振动时可能出现相似的振型, 如果在同一坐标系(动坐标系或静止坐标系)下转、静子频率相近, 则可能发生振型协调共振。

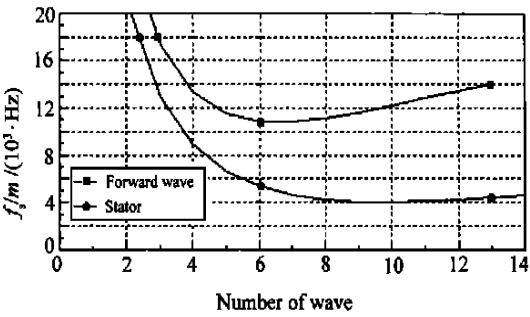


图 5 前行波振型协调

Fig 5 V ibration mode hamonize in forward wave

按照薄壁结构振动特性的分析方法, 对该篦齿封严装置进行振型协调分析。图 5 和图 6 分别为篦齿封严装置在转子件前行波和后行波情况下

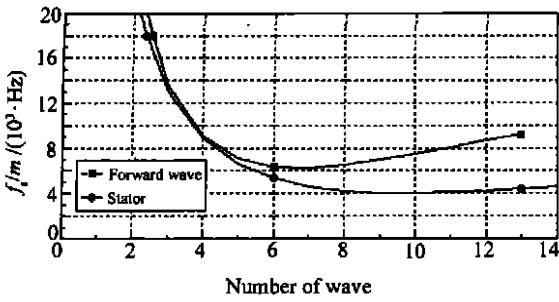


图 6 后行波振型协调

Fig 6 Vibration mode harmonize in backward wave

与静子件的振型协调共振图,所有频率均相对于静止坐标系。

从图 5 和图 6 中可以看出,封严件在转子后行波波数为 4 时的振型协调共振裕度最小,经计算此处裕度为 9%,不符合设计规范最小裕度大于 20% 的要求。

4 气弹稳定性分析

4.1 气动参数计算

本文采用改进的双控制体气动模型及相应程

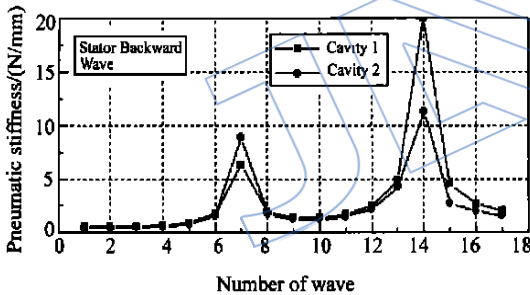


图 7 气动刚度随周波数变化

Fig 7 Pneumatic stiffness changed with the number of wave

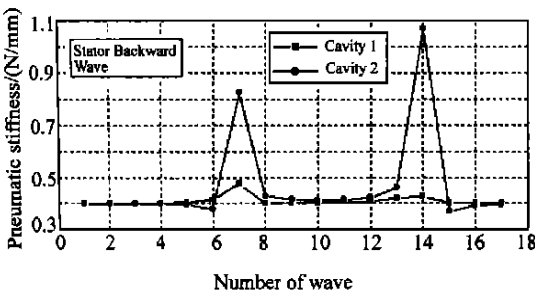


图 8 气动阻尼随周波数变化

Fig 8 Pneumatic damp changed with the number of wave

序^[2],计算出篦齿封严装置在节径型振动情况下的气动刚度和气动阻尼,结果见图 7~ 图 10。

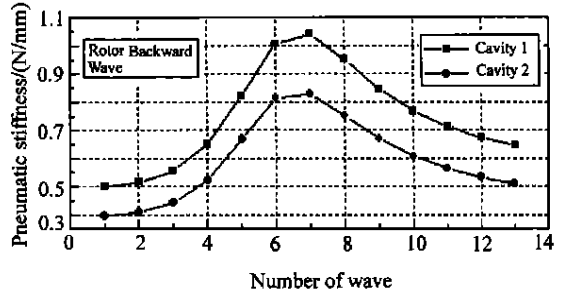


图 9 气动刚度随周波数变化

Fig 9 Pneumatic stiffness changed with the number of wave

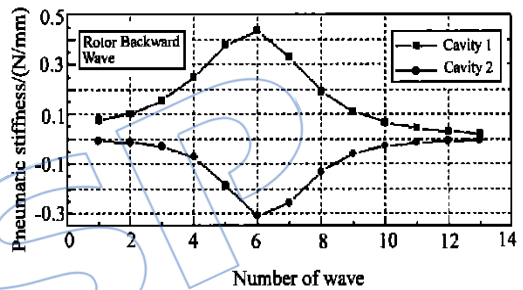


图 10 气动阻尼随周波数变化

Fig 10 Pneumatic damp changed with the number of wave

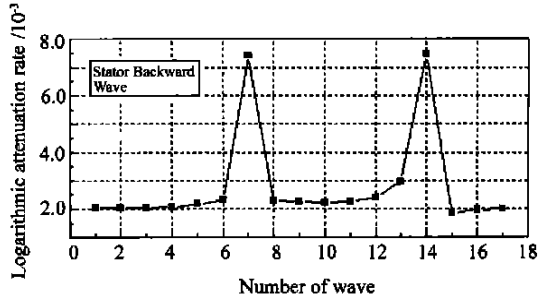


图 11 对数衰减率

Fig 11 Logarithmic attenuation rate

从图中的计算结果可以看出,该篦齿封严装置在某些周波情况下气动阻尼为负值,如静子件后行波波数为 6 和 15 时,转子件在后行波波数从 2~ 12 时。但从数值来看,这些负的气动阻尼均较小,是否会引起系统失稳,应在进一步的稳定性分析中获得结论。

4.2 气弹稳定性分析

本文采用复特征值法,利用有限元程序,对图

1 所示的篦齿封严装置模型进行了气弹稳定性分析, 气动刚度和气动阻尼由前面计算获得。分析结果见图 11 和图 12。

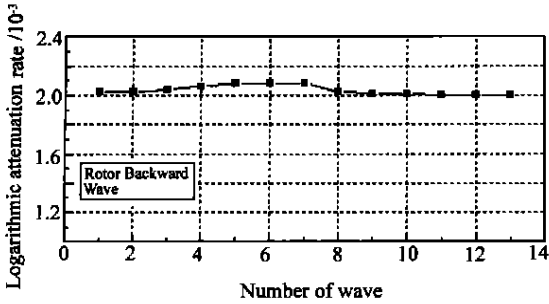


图 12 对数衰减率

Fig 12 Logarithmic attenuation rate

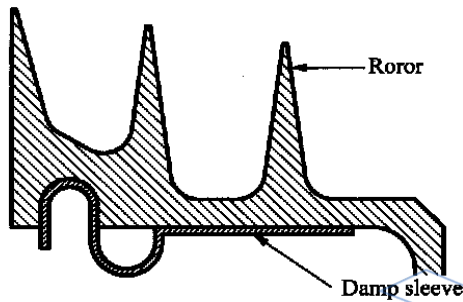


图 13 转子带阻尼套筒

Fig 13 Rotor with damp sleeve

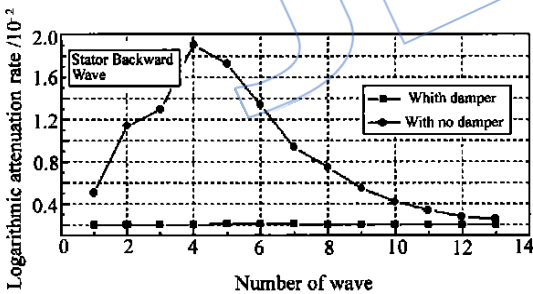


图 14 带与不带阻尼器的对数衰减率

Fig 14 Logarithmic attenuation rate of labyrinth seal with damp sleeve

从图 11 和图 12 中可以看出, 该模型由于刚度较强, 所以静子和转子的稳定性较好, 在正常工作状态不会出现失稳现象。但由于在某些振型下

存在负的气动阻尼, 为防止篦齿封严装置在工作状态出现变化(例如: 进口压力增高、转速超过设计工作转速等)情况下出现失稳, 安装阻尼减振装置还是有一定必要的。

5 带阻尼器的稳定性分析

由于该篦齿封严装置在某些模态下存在负的气动阻尼, 为安全起见, 在封严装置的转子件上安装了阻尼套筒以增加其稳定性, 事实上实际发动机在这个篦齿封严装置上确实安装了阻尼套筒。阻尼套筒形式见图 13。

本文对带阻尼套筒的篦齿封严装置的稳定性进行了分析, 带阻尼套筒和不带阻尼套筒的篦齿封严装置的对数衰减率见图 14。

从图 14 中对数衰减率的变化情况, 可以看出, 安装了阻尼器的篦齿封严装置的稳定性大为提高, 尤其对易于出现失稳的低频振型, 其减振、增加稳定性的效果最好。

6 结 论

通过对某实际航空发动机篦齿封严装置的全面分析, 可以得出以下结论:

- (1) 该篦齿封严装置的声固耦合共振裕度不符合规范要求, 应加装减振吸声装置。
- (2) 该篦齿封严装置的振型协调共振裕度不符合规范要求, 应对转静子件进行调频处理。
- (3) 该篦齿封严装置在某些模态下存在负的气动阻尼, 会降低系统的稳定性, 应加以重视, 安装阻尼装置。
- (4) 该篦齿封严装置在正常工作状态下不会出现失稳现象。
- (5) 该篦齿封严装置加装阻尼套筒后, 转子件的稳定性会有较大的提高。

参考文献:

[1] 晏砺堂, 朱梓根, 李其汉, 等. 高速旋转机械振动[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994

[2] 李辉. 篦齿封严装置气动弹性稳定性和减振研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2001