航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Feb. 25 2019 Vol. 30 No.2 60-65

弹性环刚度分析方法及结构参数对刚度的影响

刘文魁[1,2,*]，邓旺群[1,2]，彭春雷[1,2]，孙勇[1]，唐虎标[1]
1. 中国航发湖南动力机械研究所，湖南 株洲 412002
2. 中国航空发动机集团航空发动机振动技术重点实验室，湖南 株洲 412002

摘　要：针对弹性环刚度分析方法及结构参数对刚度的影响开展研究。以某涡轴发动机动力涡轮转子弹性环为研究对象，利用有限元法对弹性环刚度进行了分析，试验验证了分析方法的有效性，此外，还分析了弹性环的凸台数目、壁厚、轴向宽度等对其刚度的影响，揭示了弹性环的刚度随主要结构参数的变化规律，为弹性环的刚度和结构设计提供指导。

关键词：涡轴发动机；弹性环；刚度；有限元

中图分类号：V231.96　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.02.011

常见的弹性支承类型主要有笼条式和弹性环式两类，弹性环式弹性支承具有结构简单、重量（质量）轻和占用空间小等优点，在中小型航空发动机中得到了广泛应用[1,2]。

弹性环的径向刚度（均简称刚度）对转子系统的临界转速、振型、不平衡响应，以及传递特性等有重要影响，因此，在发动机设计初期，如何准确获得弹性环的支承刚度显然尤为重要[3~6]。

弹性环的刚度分析主要有解析法和有限元法，其中解析法精度较低，只能对弹性环刚度的量级进行预估[3]；有限元法能够考虑弹性环的几何细节特征，计算精度较高，得到了广泛应用[7,8]。

某型涡轴发动机燃气发生器转子和动力涡轮转子采用了轴承共腔结构，其动力涡轮轴承座的空间狭小，5号和6号轴承位置非常适合采用弹性环式的弹性支承方案，但弹性环在涡轴发动机上的使用经验缺乏，有必要针对弹性环的刚度分析和结构设计开展深入研究，为弹性环最终应用于涡轴发动机提供指导。

1 弹性环刚度分析

1.1 弹性环结构简介

弹性环的主要结构参数包括凸台高度Δ，壁厚h，凸台宽度b，凸台倒圆半径R，凸台数目m，内径D_1，外径D_2，轴向宽度L，如图1所示。

某涡轴发动机动力涡轮转子5号和6号弹性环带油膜孔和防转槽结构，材料为60Si2MnA，其结构示意图如图2

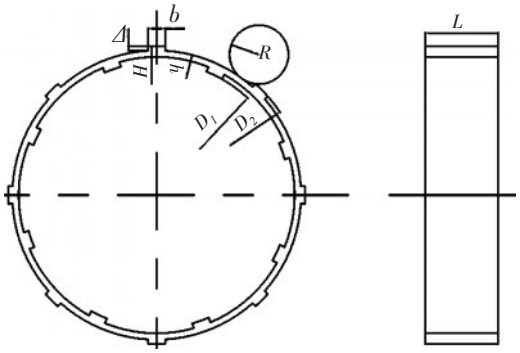

图1　弹性环结构参数示意图
Fig. 1　The diagram of structure parameter of elastic ring

收稿日期：2018-11-05；退修日期：2019-01-10；录用日期：2019-01-25
基金项目：航空科学基金（2013ZB08001）
*通信作者.Tel.：15773325670　　E-mail：1623905079@qq.com
引用格式：Liu Wenkui, Deng Wangqun, Peng Chunlei, et al. Analysis method on the stiffness of elastic ring and the effect of its structure parameters on the stiffness[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(02): 60-65. 刘文魁，邓旺群，彭春雷，等. 弹性环刚度分析方法及结构参数对刚度的影响[J]. 航空科学技术，2019，30(02)：60-65.

所示，主要结构参数见表1，其在发动机上的装配结构示意图如图3所示，弹性环的传力路径为：轴承载荷传至衬套，再传至弹性环后传递给动力涡轮轴承座，通过安装边传至外部机匣。弹性环与衬套之间和弹性环与轴承座之间均是过渡配合关系。

图2 弹性环结构示意图

Fig.2 The structure diagram of elastic ring

表1 弹性环主要结构参数

Table 1 The main structure parameters of elastic ring

内径/mm	外径/mm	凸台数	凸台高度/mm	壁厚/mm	凸台宽度/mm	宽度/mm	倒圆半径/mm
80.2	83	8	0.20	1.0	4	21	10

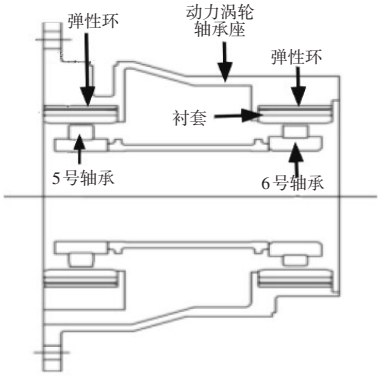

图3 弹性环在发动机上装配结构示意图

Fig.3 The structure diagram of the fitting of elastic ring in engine

1.2 有限元模型及边界条件

计算时，考虑弹性环的受载边界条件，在弹性环内、外环建立内、外圆环进行刚度分析，假设内、外圆环的材料弹性模量远大于弹性环的值，假设为刚性结构。弹性环刚度计算模型如图4所示，有限元网格图如图5、图6所示。

边界条件施加方法如下：

(1)弹性环与内、外圆环之间建立标准无摩擦接触；

(2)约束外圆环的外径环面(图4中面A)所有节点的位移(轴向、径向及周向)。

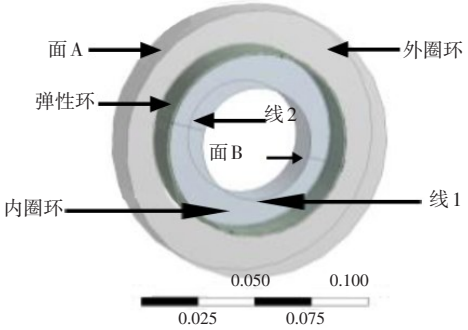

图4 计算模型(单位：m)

Fig.4 Calculation model(unit：m)

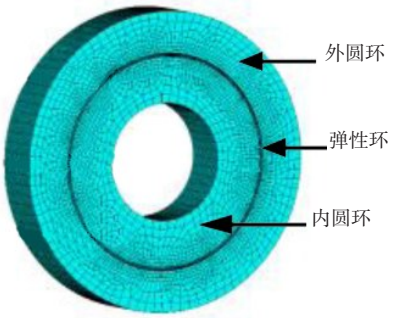

图5 有限元网格

Fig.5 Finite element mesh

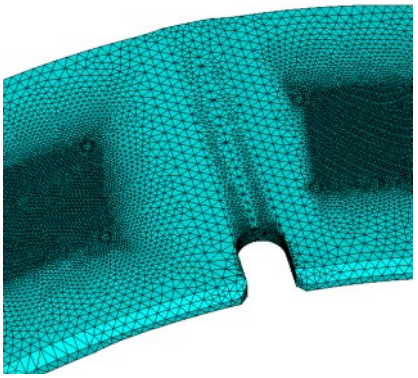

图6 有限元网格局部放大图

Fig.6 Partial enlarged detail of finite element mesh

(3)约束内圆环一侧端面任意一圆周线(图4中线1)的轴向位移及沿力路径(图4中线2方向)两个节点的周向位移。

(4)约束弹性环一侧端面任意一圆周线的轴向位移及沿力路径(图4中线2方向)两个节点的周向位移。

1.3 有限元分析结果

采用位移加载形式，对内圆环内径环面（图4中面B）所有节点进行0.2mm的位移加载（图4线2方向，此方向通过具有防转槽的外凸台中心线）。得到内圆环内径环面支反力为1265N，从而得到弹性环的刚度值为0.6325×10^7N/m，弹性环位移分布图如图7所示。

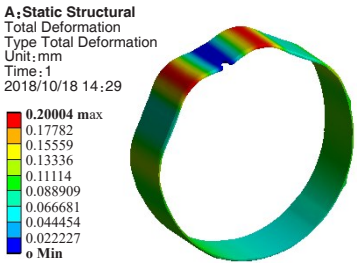

图7 弹性环位移分布图

Fig.7 The distribution diagram of displacement of elastic ring

1.4 分析方法的试验验证

为验证计算结果的准确性，对该弹性环的刚度进行了试验测量。为了能真实地反映弹性环工作时的刚度，根据弹性环工作特点，模拟弹性环在发动机上的实际安装状态，专门设计了一套专用夹具测量弹性环刚度，保证夹具与弹性环的配合关系与弹性环工作时一致。

弹性环刚度测量示意图和测量装置实物照片分别如图8、图9所示，安装状态示意图如图10所示，弹性环内环面与衬套相连，衬套套在芯棒上，芯棒与球头杠杆通过螺栓连接，杠杆另一端穿过转接轴，转接轴固定在支座上，转接轴在支座内能自由转动，挂钩放置在杠杆开孔处，通过添加砝码实现加载。

试验时依次施加5kg、10kg、15kg、20kg和25kg砝码，用电涡流位移传感器测量各载荷下弹性环的位移值S，根据刚

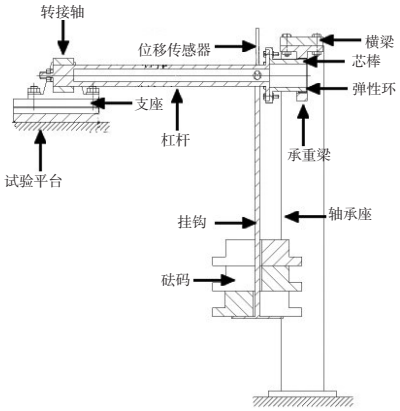

图8 弹性环刚度测量示意图

Fig.8 The diagram of stiffness measurement of elastic ring

图9 弹性环刚度测量装置实物照片

Fig.9 The photo of the measuring equipment of the stiffness of elastic ring

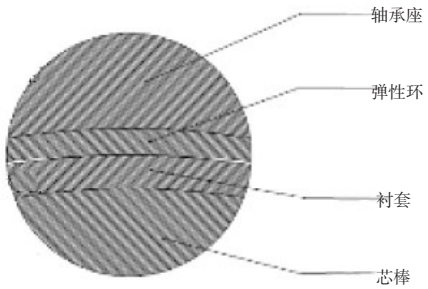

图10 弹性环安装状态示意图

Fig.10 The diagram of installation condition of elastic ring

度定义公式：

$$K=F/S$$

式中：K为结构的静刚度；F为试验载荷；S为加载处位移。

对F和S进行线性拟合获得弹性环刚度值。为减少测量误差，采用多次测量取平均值的方法。弹性环的刚度测量结果见表2。

由表2可知，弹性环的刚度测量值（平均值）为0.584×10^7N/m。弹性环刚度计算值与实测值的对比分析结果

表2 弹性环刚度测量结果

Table 2 Measurement results of the stiffness of elastic ring

载荷/N	位移/m		
	第1次	第2次	第3次
0	0	0	0
49.03	1.01E−05	1.09E−05	1.09E−05
98.07	1.96E−05	2.05E−05	2.06E−05
147.10	2.85E−05	2.93E−05	2.94E−05
196.13	3.65E−05	3.67E−05	3.79E−05
245.17	4.34E−05	4.44E−05	4.45E−05
拟合刚度/(N/m)	5.86E+06	5.87E+06	5.78E+06
平均值/(N/m)	5.84E+06		

见表3。

表3 有限元分析结果与试验结果对比

Table 3 The contrast between finite element analysis results and experiment results

实测值/(N/m)	计算值/(N/m)	计算误差/%
0.584×10^7	0.6325×10^7	8.3

从表3可知，提出的有限元分析方法可以较精确地计算出弹性环的刚度，计算误差仅8.3%。

2 结构参数对刚度的影响研究

以原设计弹性环为基准，针对弹性环的主要结构参数对刚度的影响规律开展研究。

2.1 刚度随凸台数目的变化规律

保持其他结构参数不变，改变凸台数目m，得到的刚度随凸台数目的变化曲线，如图11所示，弹性环刚度随凸台数目的增加会显著增大。

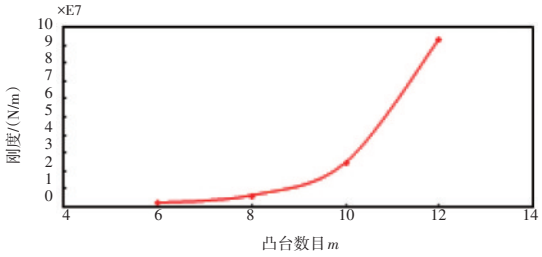

图11 刚度随凸台数目m的变化

Fig. 11 The stiffness varies with the number of protrusion platform m

2.2 刚度随弹性环轴向宽度的变化规律

保持其他结构参数不变，仅改变弹性环的轴向宽度L，得到的刚度随轴向宽度的变化曲线，如图12所示，从图12可知，弹性环刚度随弹性环轴向宽度的增加而增大，近似于线性变化规律。

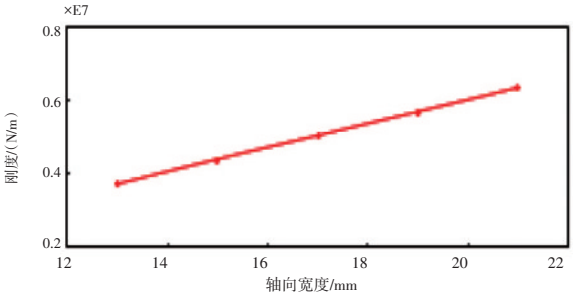

图12 刚度随弹性环轴向宽度L的变化

Fig.12 The stiffness varies with the axial width of elastic ring L

2.3 刚度随壁厚的变化规律

保持其他参数不变，仅改变弹性环壁厚h(外径不变，改变内径)，得到的刚度随壁厚的变化曲线如图13所示，从图13可知，弹性环的刚度随厚度增大而显著增大，当壁厚由1mm增大到1.9mm时，刚度增大了471%。

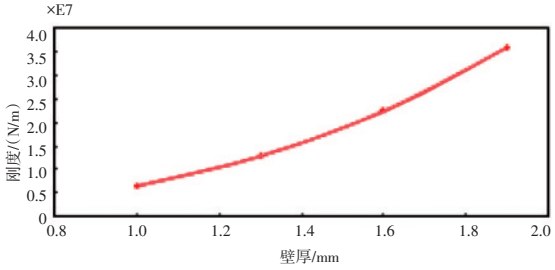

图13 刚度随壁厚h的变化

Fig.13 The stiffness varies with the wall thickness h

2.4 刚度随凸台倒圆半径的变化规律

保持其他结构参数不变，仅改变弹性环的凸台倒圆半径R，得到的刚度随凸台倒圆半径的变化曲线如图14所示，从图14可知，弹性环凸台倒圆半径R的增大，相当于局部增大了弹性环的壁厚，会使弹性环刚度略有增大，但影响很小，凸台倒圆半径由2mm增大到18mm，刚度仅增加了8%，因此倒角R不能作为弹性环刚度设计的主要参数。

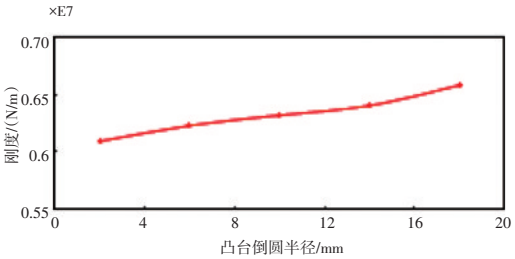

图14 刚度随凸台倒圆半径R的变化

Fig.14 The stiffness varies with the reciprocal radius of protrusion platform R

2.5 刚度随凸台宽度的变化规律

保持其他结构参数不变，仅改变弹性环的凸台宽度b，得到的刚度随凸台宽度的变化曲线如图15所示，从图15可知，弹性环凸台宽度的增大，也相当于局部增大了弹性环的壁厚，会使弹性环的刚度显著增大。

2.6 刚度随内外径大小的变化规律

保持其他结构参数不变，仅改变弹性环的内外径(保持壁厚和凸台高度不变)，得到的刚度随内外径的变化曲线如图16所示，从图16可知，弹性环内外径的增大，每两个凸台间的距离将增大，弹性环的刚度略有下降。

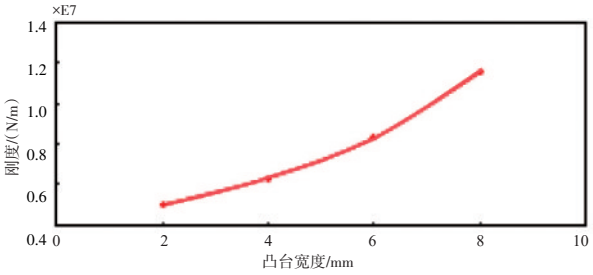

图15 刚度随凸台宽度 b 的变化

Fig. 15 The stiffness varies with the width of protrusion platform b

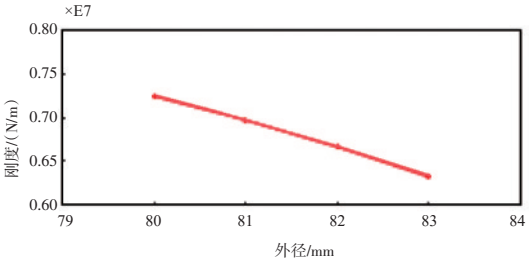

图16 刚度随外径 D_2 的变化

Fig.16 The stiffness varies with the external diameter D_2

2.7 刚度随凸台高度的变化规律

保持其他结构参数不变，仅改变弹性环的内外凸台高度 Δ（壁厚不变，改变内外径），得到的刚度随凸台高度的变化曲线如图17所示，从图17可知，弹性环的刚度随凸台高度的增大会略有增大。

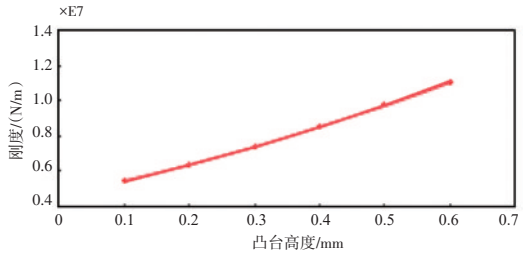

图17 刚度随凸台高度 Δ 的变化

Fig.17 The stiffness varies with the height Δ of protrusion platform

3 结论

本文针对弹性环刚度分析方法及结构参数对刚度的影响开展研究，主要结论如下：

（1）提出的弹性环刚度有限元分析方法可以较精确地计算出弹性环的刚度。

（2）弹性环的凸台数目、壁厚和凸台宽度对弹性环的刚度均影响很大，弹性环轴向宽度、凸台倒圆半径、内外径和凸台高度对其刚度的影响较小。因此，在弹性环刚度设计中，应当优先考虑通过调整弹性环的凸台数目、壁厚、凸台宽度来达到目标刚度值。

参考文献

[1] 周明，李其汉，晏砺堂．弹性环式挤压油膜阻尼器减振机理研究[J]．航空动力学报，1998，13(4)：403-407.
Zhou Ming, Li Qihan, Yan Litang. Research on vibration reduction mechanism of elastic ring squeeze film damper[J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(4)：403-407.(in Chinese)

[2] 朱益利，徐龙祥．带弹性环保护轴承的动力学特性[J]．机械工程学报，2011，47(21)：49-57.
Zhu Yili, Xu Longxiang. Dynamic characteristics of auxiliary bearing with elastic ring[J].Journal of Mechanical Engineering, 2011,47(21):49-57. (in Chinese)

[3] 付才高，郑大平，欧园霞，等．航空发动机设计手册：转子动力学及整机振动[M]．北京：航空工业出版社，2000.
Fu Caigao, Zheng Daping, Ou Yuanxia, et al. Aeroengine design manual: Rotor dynamics and vibration of the whole machine[M].Beijing: Aviation Industry Press,2000. (in Chinese)

[4] 曹磊．组合弹性支撑-阻尼系统动力特性理论及试验研究[D]．南京：南京航空航天大学，2006.
Cao Lei. Research on the theory of dynamic character and experiment of combined elastic support-damper system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)

[5] Tllema H G, Wensing J A. Validation of a rotor dynamics model with viscoelastic bearing support[C]//Proceedings of the International Conference on Structural Dynamics Modelling, Maderial,Portugal,2002.

[6] 张大义，母国新，洪杰．航空发动机转子支承系统刚度计算中的几个问题[J]．战术导弹技术，2005(2):20-23.
Zhang Dayi, Mu Guoxin, Hong Jie. Problems in calculating stiffness of rotor bearing system of aero-engine[J]. Tactical Missile Technology, 2005(2):20-23. (in Chinese)

[7] 龙向阳，洪杰，张大义，等．弹性环刚度强度的分析方法与力学特性研究[J]．热能动力工程，2010，25(2):145-149.

Long Xiangyang, Hong Jie, Zhang Dayi, et al. Research on analytical method and dynamic character of stiffness and strengthen of elastic ring[J].Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010,25(2):145-149. (in Chinese)

[8] 洪杰,邓吟,张大义.弹性环式挤压油膜阻尼器动力设计方法[J].北京航空航天大学学报,2006,32(6):650-653.
Hong Jie, Deng Yin, Zhang Dayi. Method of dynamic design of elastic ring squeeze film damper[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(6): 650-653. (in Chinese)

作者简介

刘文魁(1993－) 男,硕士研究生。主要研究方向:航空发动机结构强度与振动。

Tel: 15773325670

E-mail: 1623905079@qq.com

Analysis Method on the Stiffness of Elastic Ring and the Effect of its Structure Parameters on the Stiffness

Liu Wenkui[1,2,*], Deng Wangqun[1,2], Peng Chunlei[1,2], Sun Yong[1], Tang Hubiao[1]

1. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China

2. Key Laboratory of Aero-engine Vibration Technology, Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou 412002, China

Abstract: Analysis method on the stiffness of elastic ring and the effect of its structure parameters on the stiffness were researched. Taking the elastic ring of a power turbine rotor of a turbine shaft engine as research object, the stiffness of the elastic ring was calculated by analysis method, and the validity of the analytical method was verified by experiments. In addition, how items like the number of protrusions, the thickness and axial width of the elastic ring affecting the stiffness was also discussed, leading to the rule of how the stiffness of elastic ring changing with the main structure parameters discovered. This research will provide guidance to the stiffness and structure design of elastic ring.

Key Words: turbine shaft engine; elastic ring; stiffness; finite element method

Received: 2018-11-05； **Revised:** 2019-01-10； **Accepted:** 2019-01-25

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2013ZB08001)

***Corresponding author.Tel.** :1573325670 **E-mal:**1623905079@qq.com