

高稳定性轮辐式弹性环设计方法及静/动刚度特性研究

杨廷昭¹ 王永锋¹ 邓旺群^{2,3} 杨海^{2,3} 刘文魁^{2,3} 洪杰¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

(2. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002)

(3. 中国航空发动机集团航空发动机振动技术重点实验室, 株洲 412002)

摘要:【目的】针对航空发动机凸台式弹性环支承结构大载荷下易出现刚度非线性、周向刚度波动大的问题,开展高力学稳定性轮辐式弹性环设计方法与静/动刚度特性研究,解决经典结构支承稳定性不足的工程痛点。【方法】首先,提出新型轮辐式弹性环结构方案与力学模型,识别关键设计参数,建立标准化设计流程,为结构方案设计提供支撑;其次,建立基于Ansys软件的弹性环静/动刚度仿真方法,掌握关键结构参数对刚度特性的影响规律,实现参数优化选取;最后,搭建静刚度测试系统,开展多工况刚度特性试验研究,验证结构性能与仿真方法的准确性。【结果】结果表明,新型轮辐式弹性环周向刚度波动不超过1.7%,周向均匀性远优于经典结构;0~500 Hz动载荷激励下,动刚度变化控制在1.5%以内,无刚度突变;大载荷下无刚度非线性特征,刚度仿真与试验结果误差小于5%,可为转子支承系统设计提供参考。

关键词: 弹性环; 结构特征; 静刚度试验; 动刚度; 有限元仿真

中图分类号: V231.96 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.06.002

0 引言

弹性环是航空发动机中广泛应用的弹性支承结构。调整支承刚度可有效调节转子-支承系统的临界转速^[1-2],保证工作转速下具备足够的共振安全裕度^[3-4]。该类结构体积小、质量轻、装配便捷,在航空发动机领域的应用场景持续增多。

经典弹性环支承结构通过内凸台与轴承外环配合,外凸台支承于轴承座,依靠凸台间的弹性段调整支承刚度。目前,经典构形的凸台式弹性环已被广泛应用,国内外学者针对其设计方法及支承刚度敏感影响因素已开展大量研究^[5-7]。THENNAVARAJAN等^[8]对弹性环式挤压油膜阻尼器转子过临界转速过程的阻尼特性开展了定量研究。DILIGENSKIY等^[9-10]针对不同配合状态的弹性环开展研究,明确了弹性环刚度对间隙状态更为敏感,并给出了公差设计建议。曹磊等^[11]采用解析计算方法与有限元仿真方法开展了弹性环刚度的计算,明确了有限元方法可更全面地考虑结构及接触特征,获取精度更高的刚度计算结果。李兵等^[12]通过试验研究了凸台高度对弹性环式挤压油膜阻尼器油膜刚度的非线性影响规律,确定了凸台

最优设计高度。罗忠等^[13]针对弹性环动刚度开展仿真与试验研究,明确不同频率动载荷激励会引发弹性环支承刚度变化,航空发动机临界转速详细设计阶段需要考虑支承系统动刚度的影响。

凸台式弹性环采用内、外凸台界面配合,结构简单、装配便捷,但在大载荷工况下,局部凸台变形及配合界面状态变化会直接影响支承刚度的稳定性。李岩等^[14]明确了接触界面引发的凸台式弹性环支承刚度的非线性特征,表现为在大载荷下刚度显著上升。龙向阳等^[15]考虑凸台周向离散分布的特征,开展了对弹性环周向刚度分布特性的研究。结果表明,凸台式弹性环周向刚度分布存在显著的不均匀性,当凸台个数为6~14时,对应的周向刚度波动范围达5%~35%。

针对大载荷下凸台式弹性环刚度非线性、周向刚度不均等核心问题,国外学者已提出多种具备高力学稳定性的新型弹性环设计方案。HERBORTH等^[16]设计了一种多承力板条组成的柔性环结构,可通过环周凸起与内、外接界面配合。KNAPP^[17]提出一种多沟槽与圆弧板条组合的迷宫式弹性环,可依靠弹性弧板提供支承刚度。CASARO^[18]研制了一种内、外层薄环与周向均布辐板组合的弹性支承结构,通过辐板调节支

收稿日期: 2024-10-10 修回日期: 2024-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52205082, 52075018)

作者简介: 杨廷昭,男,1999年生,甘肃白银人,硕士研究生; 主要研究方向为转子动力学及振动控制; E-mail:3521227708@qq.com。

邓旺群(通信作者),男,1967年生,湖南株洲人,博士,研究员; 主要研究方向为航空发动机强度试验和转子动力学; E-mail:hnzzdwq@163.com。

引用格式: 杨廷昭,王永锋,邓旺群,等. 高稳定性轮辐式弹性环设计方法及静/动刚度特性研究[J]. 机械强度,2026,48(6):10-18.

YANG Tingzhao, WANG Yongfeng, DENG Wangqun, et al. Research on design method of high-stability spoke-type elastic ring and its static/dynamic stiffness characteristics[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(6): 10-18.



免费获取

承刚度,依靠全圆环面实现内、外配合,显著提升了结构的稳定性。目前,国内外针对新型弹性环支承结构的研究仍集中于结构方案设计阶段,其静/动刚度等核心力学特性的系统研究与试验验证仍有待完善。

针对经典凸台式弹性环在大载荷工况下刚度非线性、周向刚度不均的工程痛点,以及现有新型弹性环研究多停留在结构方案设计阶段、核心力学特性验证不足的现状,提出一种新型轮辐式弹性环设计方法,通过全圆环面配合,规避大载荷下经典弹性环局部凸台界面带来的力学不稳定性问题,并建立轮辐式弹性环力学模型,识别其敏感设计参数,开展静/动刚度特性及参数影响规律系统研究。仿真与试验结果表明,新型轮辐式弹性环在大载荷下刚度稳定,周向刚度分布均匀性显著提升,可实现对转子系统的稳定支承,为转子-支承系统设计提供参考。

1 结构特征与设计方法

1.1 结构及受力特征

弹性环支承结构通常安装于轴承座与轴承外环之间,内圈与轴承外环配合,外圈支承于轴承座,如图 1 所示。经典凸台式弹性环仅通过离散分布的凸台与轴承外环、轴承座接触,且仅能传递压力,无法传递拉力。

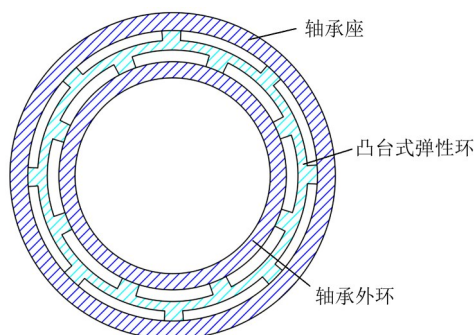


图 1 经典弹性环支承结构装配示意图

Fig. 1 Assembly diagram of the traditional elastic ring support structure

在一定载荷范围内,凸台式弹性环具备近似线性的支承刚度,可为转子提供稳定的支承约束。但在大载荷作用下,一方面,局部接触的凸台易产生变形、界面滑落等特征,引发凸台支承状态改变;另一方面,过大载荷会造成弹性段变形过大,进而使弹性环与轴承座发生接触。这 2 类因素均会引发弹性环支承刚度的非线性特征^{[19]124-132},直接影响转子的支承稳定性。图 2 所示为经典凸台式弹性环刚度随载荷的变化曲线。

凸台沿周向离散分布的特征,会造成载荷作用于凸台与弹性段时的支承刚度存在差异,即弹性环周向刚度的非均匀特征,如图 3 所示。其周向刚度变化最大达到了 31.3%,表现出显著的不均匀性。

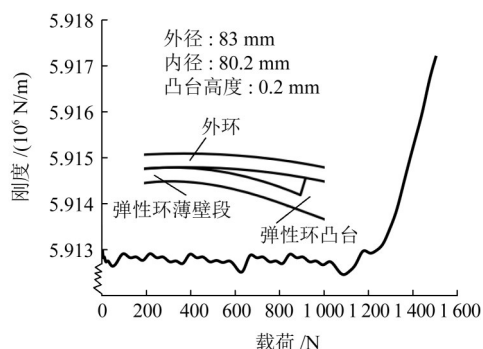


图 2 经典凸台式弹性环刚度随载荷的变化曲线

Fig. 2 Curve of the stiffness for the traditional boss-type elastic ring versus loads

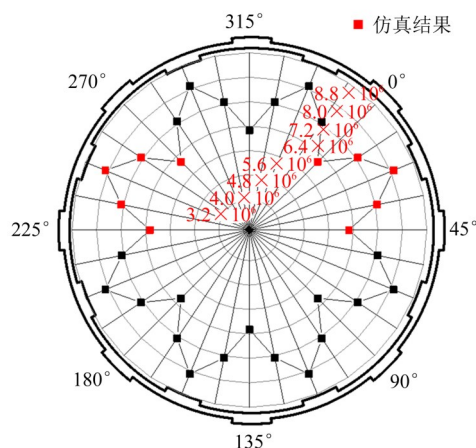


图 3 经典弹性环周向刚度分布

Fig. 3 Circumferential stiffness distribution of the traditional elastic ring

为解决经典凸台式弹性环刚度非线性、周向刚度不均等核心问题,提出新型轮辐式弹性环结构。该结构主要由内、外环壁及环壁间周向均布的辐条结构组成,具体的结构如图 4 所示。

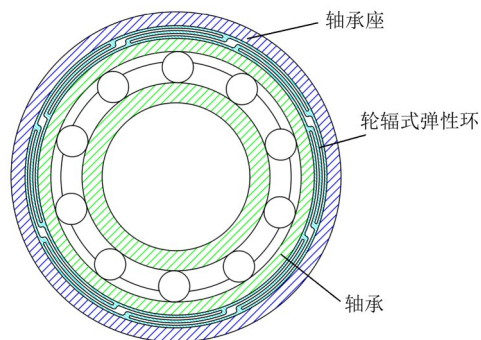


图 4 轮辐式弹性环结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of the spoke-type elastic ring

与经典凸台式弹性环相比,轮辐式弹性环无周期性凸台导致的非连续结构,配合接触面积显著提升。轮辐式弹性环的核心设计参数如图 5 所示。

主要特征参数包括:内环壁厚 Δ_1 ;外环壁厚 Δ_2 ;辐条跨度 θ ;辐条厚度 H ;辐条个数 n ;内、外过渡圆角半径 r 、 R ;弹性环轴向长度 B 。

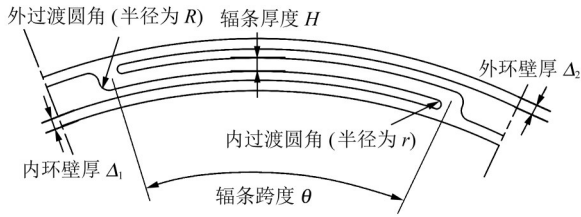


图5 轮辐式弹性环设计参数示意图

Fig. 5 Schematic diagram of design parameters for the spoke-type elastic ring

1.2 力学模型及设计流程

轮辐式弹性环内环受径向载荷作用时产生径向位移,外环固定于轴承座保持静止,内环挤压辐条产生弯曲变形,进而提供弹性环的径向支承刚度,如图6所示。单根辐条支承结构可简化为一端固定的弹性系统。

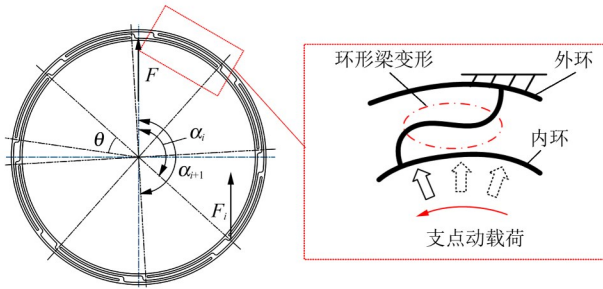


图6 辐条结构力学模型简图

Fig. 6 Simplified diagram of the mechanical model for the spoke structure

轮辐式弹性环周向布置多组均布辐条结构,整体径向刚度为各辐条刚度的叠加。基于弹性环安装后,外环固定、内环随轴承外环同步运动的边界条件,将辐条简化为一端固支的悬臂梁^{[19]124-132[20-21]},分别计算径向与切向分力引发的变形,两者叠加即为辐条总位移。

径向分力引发的位移 x_i 为

$$x_i = F_i \cos \alpha_i L^3 / (3EI) \quad (1)$$

$$L = \theta D / 2 \quad (2)$$

$$F = \sum_{i=1}^n F_i \quad (3)$$

式中, F_i 为作用在第 i 根辐条上的总载荷; E 为材料的弹性模量; L 为辐条长度; I 为截面惯性矩, $I = BH^3/12$; D 为弹性环直径; F 为弹性环所受的载荷大小; α_i 为辐条与内环连接位置和总径向载荷方向之间的夹角(图6),且 $\alpha_{i+1} = \alpha_i + 2\pi/n$ 。

切向分力引发的位移 y_i 为

$$y_i = F_i \sin \alpha_i / EA \quad (4)$$

式中, A 为轮辐截面面积, $A = BH$ 。

刚度计算式为

$$K = \frac{F}{X} \quad (5)$$

式中, X 为弹性环内环相对于外环的总径向位移。弹性环与轴承座的接触范围可按半圆周考虑,因此,辐条总径向刚度 K 满足

$$2K = \sum_{i=1}^n F_i / x_i \cos \alpha_i + \sum_{i=1}^n F_i / y_i \sin \alpha_i \quad (6)$$

展开后可得

$$K = \sum_{i=1}^n 3EI/2 \cos^2 \alpha_i L^3 + \sum_{i=1}^n EA/2 \sin^2 \alpha_i \quad (7)$$

由上述推导可知,辐条跨度 θ 、辐条厚度 H 、辐条个数 n 和弹性环轴向长度 B 均为轮辐式弹性环径向刚度的核心影响参数。其中,辐条厚度 H 为刚度的最敏感设计参数。

基于轮辐式弹性环的结构特征与设计目标,制定标准化设计流程,如图7所示。具体步骤如下:

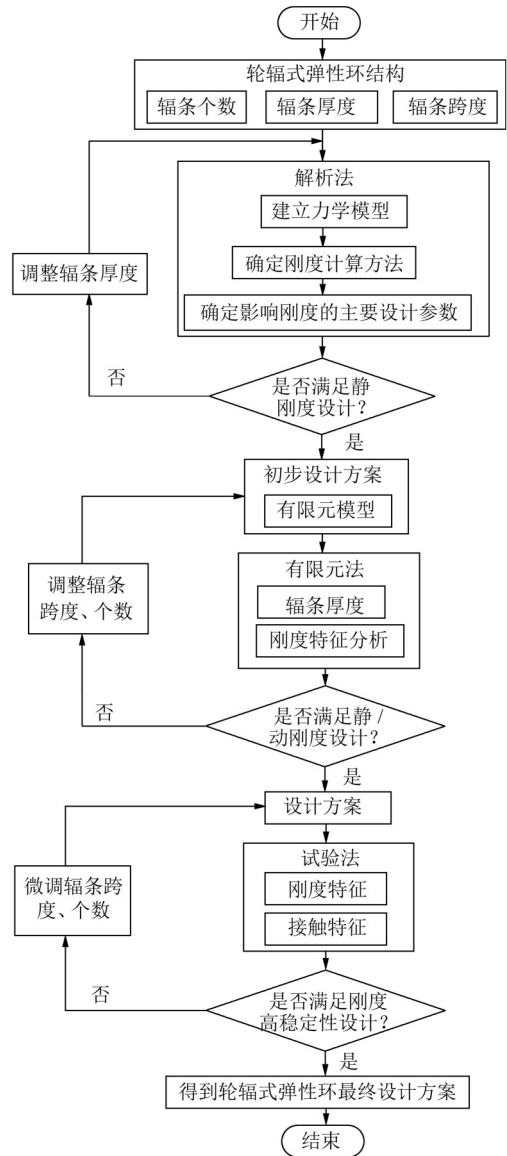


图7 轮辐式弹性环设计流程图

Fig. 7 Design flow chart of the spoke-type elastic ring

第1步,依据刚度设计要求与上述解析法,完成轮辐式弹性环初步方案的设计。刚度计算式中,辐条厚度 H 为刚度最敏感影响参数,通过调整辐条厚度 H ,获取满足静刚度设计要求的设计方案。

第2步,采用有限元法对初步设计方案开展校核

与优化调整,同步开展刚度变化规律研究。若方案无法满足静/动刚度设计要求,则依据参数影响规律,调整对刚度影响敏感度较低的辐条跨度 θ 、辐条个数 n 等参数,开展迭代设计。

第3步,采用试验方法对设计方案开展刚度校核,验证轮辐式弹性环周向刚度分布均匀性与大载荷下的刚度稳定性。通过微调特征参数开展迭代设计,满足刚度高稳定性设计要求,最终确定轮辐式弹性环设计方案。

2 刚度计算方法及参数影响规律

2.1 仿真计算方法

刚度设计是弹性环核心性能设计的关键环节。采用试验方法开展设计存在周期长、成本高的问题,因此采用有限元法开展弹性环刚度计算与方案设计。

弹性环选用 60Si2MnA 弹簧钢加工,针对涡轴发动机弹性环刚度与尺寸设计要求,基于解析法完成初步设计,获取的结构与材料特征参数如表 1 所示。

表 1 轮辐式弹性环设计参数

Tab. 1 Design parameters of the spoke-type elastic ring

参数	值
内径/mm	76
外径/mm	83
弹性环长度/mm	21
外过渡圆角/mm	0.7
内过渡圆角/mm	0.3
辐条个数	8
辐条跨度/(°)	41
辐条厚度/mm	0.9
弹性模量/GPa	204
泊松比	0.288

采用 Ansys 有限元软件开展轮辐式弹性环建模与刚度计算。建模过程中,设置内、外环辅助结构开展刚度分析。其中,外环模拟轴承座、内环模拟轴承外环,完成径向载荷与边界约束的施加。基于表 1 参数建立轮辐式弹性环有限元模型,选用 Soild186 单元完成网格划分,最终获取的有限元网格模型如图 8 所示。

外环外表面设置固定支承,约束所有方向自由度,模拟弹性环装入轴承座后的实际约束状态;内环内表面设置节点耦合,并施加 0.01 mm 的位移,模拟轴承外环对弹性环施加的径向载荷。通过仿真计算获得的弹性环变形云图如图 9 所示。

提取在施加上述位移的条件下弹性环所受径向载荷 F 的大小,径向载荷 F 与施加位移的比值即为轮辐式弹性环的径向静刚度。经仿真计算,该工况下总

径向载荷 F 为 242.71 N,计算得到轮辐式弹性环径向刚度为 2.43×10^7 N/m。

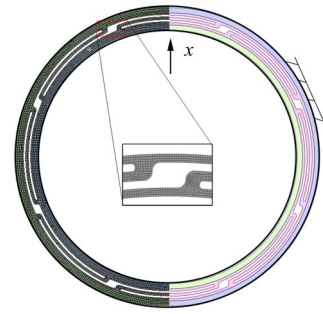


图 8 轮辐式弹性环有限元模型

Fig. 8 Finite element model of the spoke-type elastic ring

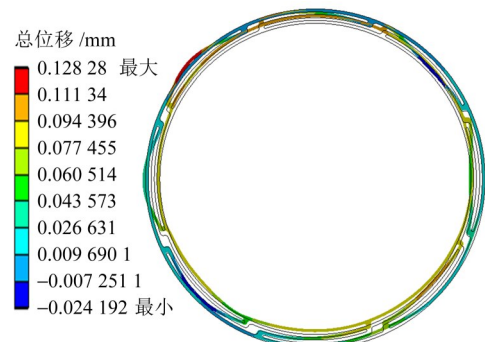


图 9 轮辐式弹性环变形云图

Fig. 9 Deformation contour plot of the spoke-type elastic ring

2.2 参数影响规律

为明确轮辐式弹性环径向刚度的参数影响规律,以辐条个数为 4、跨度为 60° 、厚度为 0.7 mm 的轮辐式弹性环为基准模型,开展单参数变量分析。

2.2.1 辐条跨度影响

静刚度随辐条跨度($45^\circ \sim 90^\circ$)的变化规律如图 10 所示。

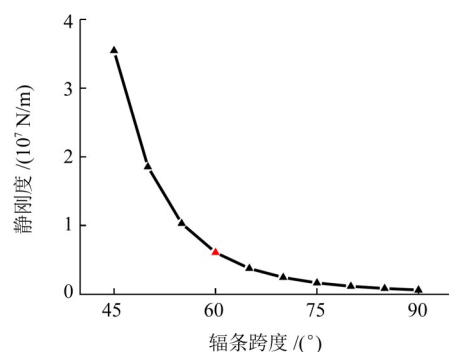


图 10 弹性环静刚度随辐条跨度的变化曲线

Fig. 10 Curve of the static stiffness varying with spoke span for elastic ring

由图 10 可知,随辐条跨度的增加,弹性环静刚度呈显著下降趋势;参数变化区间内,静刚度累计下降 99.8%。其核心影响机制为:辐条跨度增加,直接导致辐条长度 L 增大,而弹性环刚度与 L^3 成反比,因此跨度增大会引发刚度显著降低。

2.2.2 辐条厚度影响

辐条厚度在 0.3~0.9 mm 范围内时,对应的弹性环静刚度变化如图 11 所示。

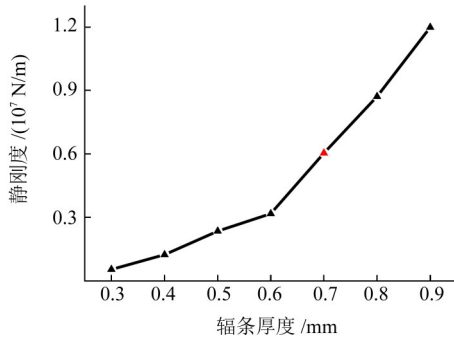


图 11 弹性环静刚度随辐条厚度的变化曲线

Fig. 11 Curve of the static stiffness varying with spoke thickness for elastic ring

由图 11 可知,随辐条厚度的增加,弹性环静刚度呈快速上升趋势;参数变化区间内,刚度最大提升 21.4 倍。其核心影响机制为:辐条厚度增加会显著提升辐条截面惯性矩 I ,进而引发弹性环刚度大幅提升。

2.2.3 辐条个数影响

静刚度随轮辐式弹性环辐条个数(3~6)变化的规律如图 12 所示。

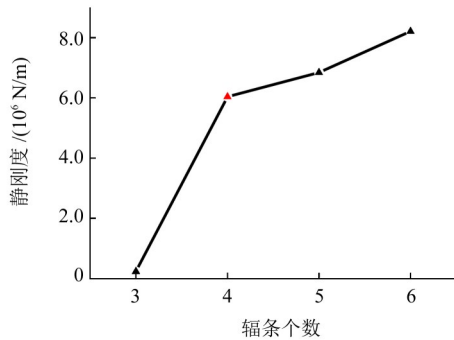


图 12 弹性环静刚度随辐条个数的变化曲线

Fig. 12 Curve of the static stiffness varying with number of spokes for elastic ring

由图 12 可知,辐条个数对弹性环静刚度影响显著;参数变化区间内,静刚度累计提升 33.5%。其核心影响机制为:弹性环整体刚度为各辐条刚度的叠加,辐条个数增加直接导致总刚度增加。

综合上述仿真结果可知,轮辐式弹性环的辐条厚度 H 为其敏感设计参数。

3 旋转激励下支承动刚度特征

3.1 仿真分析方法

为模拟弹性环内环面受到的旋转碾压激励载荷特征,在模拟轴承外环的内环面施加 2 组相互垂直、幅值相等、相位差为 90° 的径向载荷 F_1 和 F_2 ,它们的合力为绕弹性环中心旋转的径向载荷,计算不同激励频率

下轮辐式弹性环的位移响应。对轮辐式弹性环外环外表面设置固定支承,模拟轴承座的实际约束状态,动载荷施加方式与边界条件如图 13 所示。

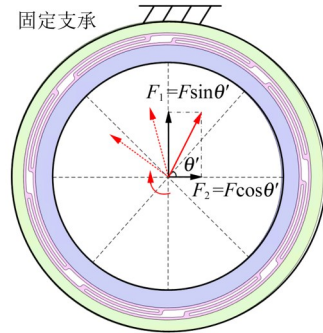


图 13 动载荷施加方式及边界条件示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the dynamic load application and boundary conditions

采用与静刚度一致的计算方法,获取轮辐式弹性环的径向动刚度。

3.2 动载荷激励下刚度特征

为明确动载荷激励下轮辐式弹性环的刚度变化特征,在 0~500 Hz(覆盖 1.5 倍工作转速范围)激励频率区间内,开展结构参数对动刚度的影响规律研究。

3.2.1 辐条跨度对动刚度的影响

对不同辐条跨度($55^\circ \sim 90^\circ$)的轮辐式弹性环开展仿真计算,动刚度随激励频率的变化规律如图 14 所示。

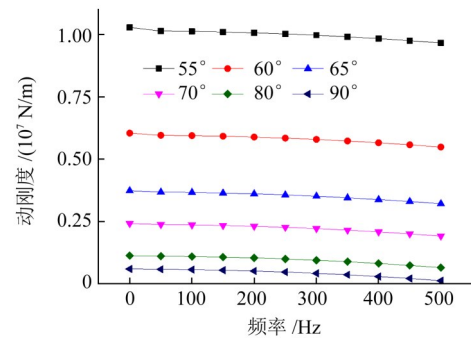


图 14 不同辐条跨度下弹性环动刚度随频率的变化曲线

Fig. 14 Curves of the dynamic stiffness varying with frequency for elastic ring under different spoke spans

由图 14 可知,弹性环动刚度随动载荷激励频率升高呈下降趋势;辐条跨度越小,动刚度随频率的变化幅度越小;跨度为 55° 时,存在最小下降幅度 6.1%。

3.2.2 辐条个数对动刚度的影响

对不同辐条个数(3~6)的轮辐式弹性环开展仿真计算,动刚度随激励频率的变化规律如图 15 所示。

由图 15 可知,随激励频率升高,不同辐条个数的弹性环动刚度均呈下降趋势;当辐条个数为 6 时,动刚度下降幅度最小,为 8.4%。

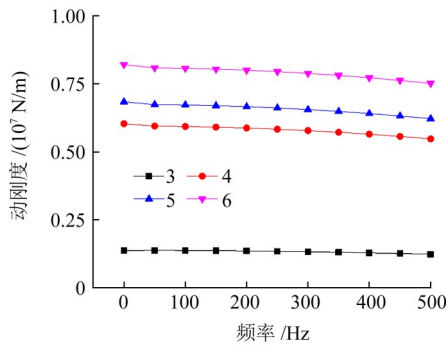


图 15 不同辐条个数下弹性环动刚度随频率的变化曲线

Fig. 15 Curves of the dynamic stiffness varying with frequency for elastic ring under different numbers of spokes

3.2.3 辐条厚度对动刚度的影响

在不同辐条厚度(0.3~0.9 mm)下,对不同频率的轮辐式弹性环的动刚度进行仿真分析,得到轮辐式弹性环动刚度随频率的变化规律,如图 16 所示。

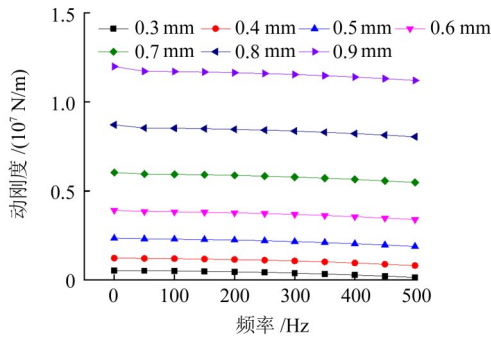


图 16 不同辐条厚度下弹性环动刚度随频率的变化曲线

Fig. 16 Curves of the dynamic stiffness varying with frequency for elastic ring under different spoke thicknesses

由图 16 可知,不同辐条厚度下,弹性环动刚度均随激励频率升高呈下降趋势;辐条厚度为 0.9 mm 时,动刚度下降幅度为 6.5%。

通过上述计算分析可知,轮辐式弹性环可通过调整设计参数,实现动刚度随激励频率的稳定变化。在表 1 所示参数下,频率为 500 Hz 时的动刚度为 2.34×10^7 N/m,较静刚度下降了 1.5%,动刚度变化稳定。

4 刚度特性试验研究

为获取高稳定性轮辐式弹性环的最优设计方案,验证轮辐式弹性环周向刚度均匀性与大载荷下的刚度稳定性,采用试验方法开展轮辐式弹性环静刚度特性研究^[22-23]。

4.1 试验系统和方法

轮辐式弹性环的静刚度通过图 17 所示的试验装置完成测量。弹性环安装于专用支座内,万能拉伸机驱动施力杆,通过模拟轴对弹性环施加径向载荷;弹性环受载产生的变形,通过布置于模拟轴两端的激光位移传感器实时采集;万能拉伸机的力传感器同步采

集施加载荷的大小。轮辐式弹性环的径向静刚度的计算式为

$$K = \Delta F / \Delta X \quad (8)$$

式中, ΔF 为施加载荷的变化量; ΔX 为弹性环径向变形的变化量。弹性环静刚度测试系统装配实物图如图 18 所示。

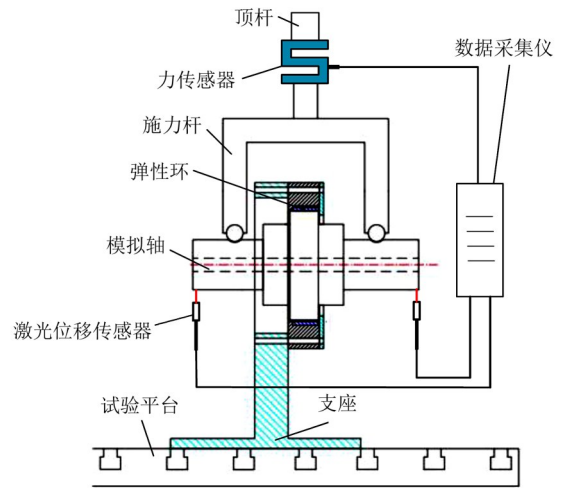


图 17 弹性环静刚度测试系统示意图

Fig. 17 Schematic diagram of the static stiffness test system for elastic ring

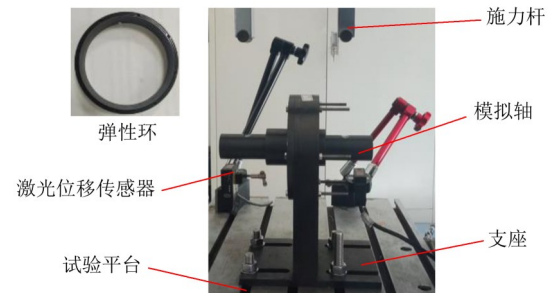


图 18 弹性环静刚度测试系统装配实物图

Fig. 18 Assembly physical drawing of the static stiffness test system for elastic ring

4.2 试验结果分析

4.2.1 仿真与试验的对比

通过试验获取的施力杆位移与拉伸机施加载荷的关系曲线如图 19 所示。为保证试验过程中弹性环接触状态稳定,正式试验前对弹性环施加预紧载荷,预紧完成后开展分级加载试验。

由图 19 可知,轮辐式弹性环的位移-载荷曲线为斜率基本恒定的直线,即弹性环刚度在加载区间内保持稳定;试验曲线与仿真曲线斜率高度一致,试验结果与仿真结果具有良好的一致性。经多次重复试验,测得弹性环静刚度平均值为 2.51×10^7 N/m。试验结果与 2 种刚度计算方法的结果对比如表 2 所示。

由表 2 可知,解析法计算结果与试验结果的相对误差为 30.1%,误差来源为解析法将圆弧段辐条简化为直悬臂梁,忽略了辐条两端圆角及过渡段的结构特

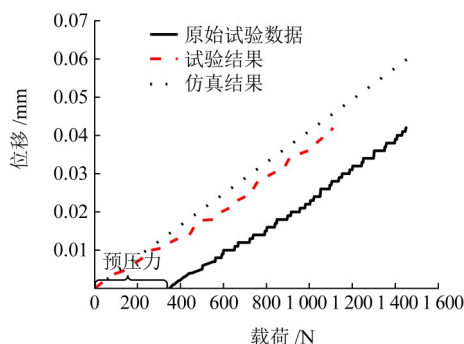


图 19 弹性环静刚度测试的位移-载荷曲线

Fig. 19 Displacement-load curves of static stiffness test of the elastic ring

表 2 弹性环刚度计算结果对比

Tab. 2 Comparison of calculation results for the elastic ring stiffness

解析法		有限元法	
数值/(N/m)	误差/%	数值/(N/m)	误差/%
1.93×10^7	30.1	2.43×10^7	3.2

征,但解析法仍可作为轮辐式弹性环径向刚度的定性判断依据;有限元仿真结果与试验结果的相对误差为 3.2%,表明有限元法可精准获取轮辐式弹性环的刚度特性,可作为结构设计与力学特性分析的核心方法。

4.2.2 不同载荷下的刚度稳定性

对相近尺寸的经典凸台式弹性环开展相同工况下的静刚度试验,获取的位移-载荷曲线如图 20 所示。

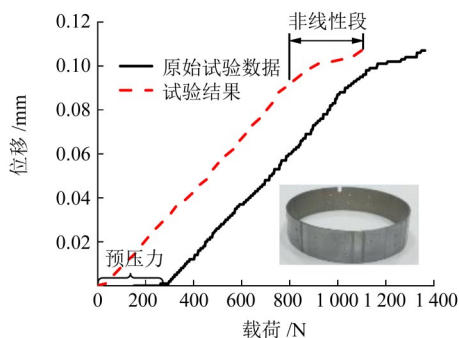


图 20 经典弹性环位移-载荷曲线

Fig. 20 Displacement-load curves of the traditional elastic ring

由图 20 可知,当经典凸台式弹性环的载荷超过 800 N 后,位移-载荷曲线斜率显著下降,对应刚度明显上升,表现出显著的刚度非线性特征。两种弹性环的位移-载荷曲线对比如图 21 所示。

由图 21 可知,与经典凸台式弹性环的刚度非线性特征相比,轮辐式弹性环的刚度在 0~1 100 N 全加载区间内保持恒定,表明该连续型结构在大载荷下可保持刚度的高稳定性。

4.2.3 周向刚度分布的均匀性

轮辐式弹性环为周向周期分布结构,因此周向刚度分布特性研究仅需分析单个周期内的刚度变化规律。弹性环周向不同位置的径向刚度测量方案如图 22

所示。

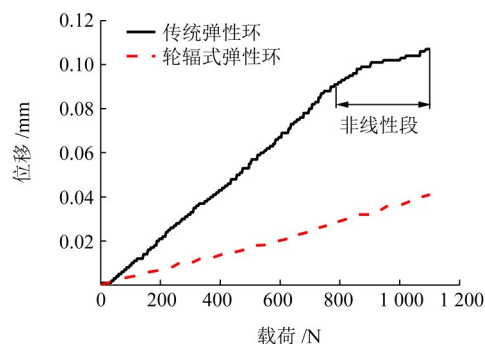


图 21 轮辐式与经典弹性环位移-载荷曲线对比

Fig. 21 Comparison of displacement-load curves between spoke-type and traditional elastic rings

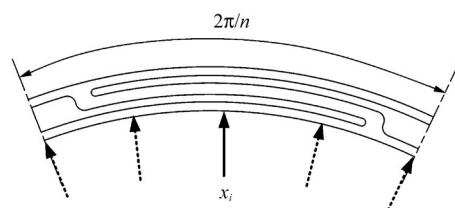


图 22 单个周期结构径向刚度计算方案示意图

Fig. 22 Schematic diagram of the calculation scheme for radial stiffness of the single periodic structure

由图 22 可知,通过周向不同位置的分级加载试验,获取表 1 所示弹性环的周向径向静刚度分布规律。对经典凸台式弹性环开展相同工况的对比试验,两种弹性环的周向相对刚度变化对比如图 23 所示。

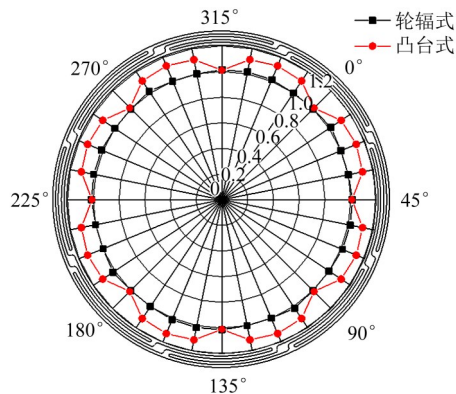


图 23 2 种弹性环相对刚度周向分布对比

Fig. 23 Comparison of the circumferential distribution of the relative stiffness between two types of elastic rings

由图 23 可知,经典凸台式弹性环的周向最大相对刚度变化量为 11.4%,而轮辐式弹性环的周向最大相对刚度变化量仅为 1.7%。轮辐式弹性环周向刚度均匀性远优于经典凸台式弹性环,表明该结构可有效降低周向刚度不均匀性。

5 结论

轮辐式弹性环为周向连续型结构,与经典离散凸台式结构相比,可有效抑制支承刚度的非线性特征。

基于该结构特征,开展轮辐式弹性环径向刚度的仿真与试验研究,得到如下主要结论:

1)经试验验证,解析法可实现轮辐式弹性环静刚度的定性估算;有限元法可精准获取弹性环静刚度数值,基于有限元法明确了弹性环刚度的参数影响规律,形成了轮辐式弹性环的标准化设计方法。

2)轮辐式弹性环动刚度随激励频率升高呈小幅下降趋势,整体变化特性稳定,通过结构参数优化,可实现1.5倍工作转速范围内动刚度变化量不超过1.5%。

3)静刚度试验结果表明,与经典凸台式弹性环相比,轮辐式弹性环在大载荷作用下无刚度非线性特征,配合界面接触状态更稳定;周向刚度均匀性显著提升,周向刚度波动量不超过1.7%。

研究内容主要围绕新型轮辐式弹性环静/动刚度仿真规律与静刚度试验展开,动刚度的精准测量及其对转子系统动力学特性的影响则有待进一步开展系统研究;尤其是针对轮辐式弹性环的转子动力学试验,受试验设计与装配难度限制,需要进一步探索,以形成标准化试验方法。

参考文献(References)

- [1] 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):649-653.
HONG Jie, DENG Yin, ZHANG Dayi. Dynamic design method of elastic ring squeeze film damper[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(6): 649-653. (In Chinese)
- [2] 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. Study on vibration damping mechanism of an elastic ring squeeze film damper[J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(4): 403-407. (In Chinese)
- [3] 曹磊. 组合弹性支承—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,2006:56-68.
CAO Lei. Theoretical and experimental study on dynamic characteristics of combined elastic support-damper[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006: 56-68. (In Chinese)
- [4] 卢玲玲,于进学. 涡扇发动机轴向定位弹性环优化设计[J]. 燃气涡轮试验与研究,2018,31(5):26-30.
LU Lingling, YU Jinxue. Optimum design of an axial positioning elastic ring of turbofan engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2018, 31(5): 26-30. (In Chinese)
- [5] TILLEMMA H, WENSING J. Validation of a rotor dynamics model with viscoelastic bearing supports [C]//Proceedings of the International Modal Analysis Conference. Enschede: University of Twente, 2002:593-602.
- [6] 王晓娟,韩知非,丁千,等. 流体惯性对弹性环式挤压油膜阻尼器-转子系统动力特性的影响[J]. 航空动力学报,2018,33(12):2981-2990.
WANG Xiaojuan, HAN Zhifei, DING Qian, et al. Influence of fluid inertia on dynamic characteristics of elastic ring squeeze film damper-rotor system [J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2981-2990. (In Chinese)
- [7] 马艳红,陆宏伟,朱海雄,等. 弹性环金属橡胶支承结构刚度设计与试验验证[J]. 航空学报,2013,34(6):1301-1308.
MA Yanhong, LU Hongwei, ZHU Haixiong, et al. Structural stiffness design and experimental evaluation of elastic ring-metal rubber damper[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(6): 1301-1308. (In Chinese)
- [8] THENNAVARAJAN S, KULKARNI S, MANIKANDAN L P, et al. Experimental evaluation of elastic ring squeeze film dampers for small gas turbine engine [C]//Proceedings of the National Aerospace Propulsion Conference. Singapore: Springer, 2020: 507-526.
- [9] DILIGENSKIY D S, NOVIKOV D K. Studying of manufacturing tolerance influence on the performance of GTE rotor elastic rings [J]. Procedia Engineering, 2017, 176:483-497.
- [10] DILIGENSKIY D S, NOVIKOV D K, PECHENIN V A, et al. Designing a technique for estimating press fit parameters of elastic rings for a rotor bearing damper [J]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2020, 49(7):618-623.
- [11] 曹磊,高德平,江和甫. 弹性环刚度特性研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2007,20(1):36-38.
CAO Lei, GAO Deping, JIANG Hefu. Investigation on stiffness characteristics of elastic ring [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 20(1): 36-38. (In Chinese)
- [12] 李兵,程定春,江志敏. 弹性环式挤压油膜阻尼器-转子系统动力特性试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2015,28(4):19-22.
LI Bing, CHENG Dingchun, JIANG Zhimin. Experiment study on dynamic characteristics of elastic ring squeeze film damper rotor system [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2015, 28(4): 19-22. (In Chinese)
- [13] 罗忠,刘家希,刘凯宁,等. 弹性环式支承结构动刚度分析及其对转子系统的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2022,43(5):667-673.
LUO Zhong, LIU Jiaxi, LIU Kaining, et al. Analysis of dynamic stiffness of the elastic ring support structure and its influence on the rotor system [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(5): 667-673. (In Chinese)
- [14] 李岩,廖明夫,王四季. 配合关系对弹性环式挤压油膜阻尼器减振特性的影响[J]. 振动与冲击,2020,39(11):232-238.
LI Yan, LIAO Mingfu, WANG Siji. Effect on vibrating attenuation by the fit of elastic ring squeeze film damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(11): 232-238. (In Chinese)
- [15] 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. Study of the methods for analyzing the rigidity and strength of an elastic ring and its mechanics characteristics [J]. Journal of Engineering for

- Thermal Energy and Power, 2010, 25(2): 145-149. (In Chinese)
- [16] HERBORTH J, RAYKOWSKI L, BEAMISH D. Bearing support flexible ring: US8337090[P]. 2012-12-25.
- [17] KNAPP M H. Bearing support: US4872767[P]. 1989-10-10.
- [18] CASARO F. Annular support for rolling bearings: US7553123 [P]. 2009-06-30.
- [19] 罗忠, 刘家希, 李雷, 等. 弹性环配合紧度对转子动力学特性的影响[J]. 机械工程学报, 2023, 59(13): 124-132.
LUO Zhong, LIU Jiayi, LI Lei, et al. Dynamic characteristics analysis of rotor system with fitting tightness of elastic ring support structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(13): 124-132. (In Chinese)
- [20] 《航空发动机设计手册》编委会. 航空发动机设计手册: 第19册 转子动力学及整机振动[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 209-214.
Editorial Committee of the *Aircraft Engine Design Manual*. Aircraft engine design manual: volume 19, rotor dynamic and unit vibration[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000: 209-214. (In Chinese)
- [21] 《机械工程材料性能数据手册》编委会. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 461-472.
Editorial Committee of the *Mechanical Engineering Materials Performance Data Handbook*. Mechanical engineering materials performance data handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 1995: 461-472. (In Chinese)
- [22] 刘世华, 张宝才, 谢隋杰, 等. 增材制造钛合金飞机结构维修件力学性能试验研究[J]. 机械强度, 2023, 45(6): 1340-1347.
LIU Shihua, ZHANG Baocai, XIE Suijie, et al. Experimental research on mechanical properties of titanium alloy aircraft structure maintenance parts by additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(6): 1340-1347. (In Chinese)
- [23] 王玮, 汤宇, 吴乙万, 等. 盆形金属橡胶三向准静态试验研究[J]. 机械强度, 2023, 45(2): 331-340.
WANG Wei, TANG Yu, WU Yiwan, et al. Experimental investigation on the tri-directional quasi-static of pot-shaped metal rubber[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(2): 331-340. (In Chinese)

Research on design method of high-stability spoke-type elastic ring and its static/dynamic stiffness characteristics

YANG Tingzhao¹ WANG Yongfeng¹ DENG Wangqun^{2,3} YANG Hai^{2,3} LIU Wenkui^{2,3} HONG Jie¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

(2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

(3. Key Laboratory of Aero-engine Vibration Technology of Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the problems of stiffness nonlinearity and large circumferential stiffness fluctuation of the traditional boss-type elastic ring support structure for aero-engines under large loads, the design method and static/dynamic stiffness characteristics of a novel spoke-type elastic ring with high mechanical stability were studied, to solve the engineering pain point of insufficient support stability of the traditional structure. [Methods] Firstly, a structural scheme and mechanical model of the novel spoke-type elastic ring were proposed, the key design parameters were identified, and a standardized design process was established to support the structural scheme design. Secondly, a static/dynamic stiffness simulation method for the elastic ring based on Ansys software was established, the influence law of key structural parameters on stiffness characteristics was mastered, and the optimal selection of parameters was realized. Finally, a static stiffness test system was built, and multi-condition stiffness characteristic tests were carried out to verify the structural performance and the accuracy of the simulation method. [Results] The results show that the circumferential stiffness fluctuation of the novel spoke-type elastic ring is no more than 1.7%, and its circumferential uniformity is much better than that of the traditional structure; under the dynamic load excitation of 0-500 Hz, the variation of dynamic stiffness can be controlled within 1.5% without sudden stiffness change; no stiffness nonlinearity occurs under large load conditions, and the relative error between the stiffness simulation and test results is less than 5%, which can provide a reference for the design of aero-engine rotor support systems.

Key words: Elastic ring; Structural characteristic; Static stiffness test; Dynamic stiffness; Finite element simulation

Corresponding author: DENG Wangqun, E-mail: hnzzdwq@163.com

Fund: National Natural Science Foundation of China (52205082, 52075018)

Received: 2024-10-10

Revised: 2024-10-26

(编辑: 李凯阳)