

波形环式弹性支座刚度的测试与数值模拟

北京航空航天大学 刘方杰*
哈尔滨工业大学 刘荣强 清华大学 戴兴建

【摘要】 进行了波形环式弹性支座刚度数值模拟研究,推导了波形环支承刚度与其离散弧段刚度之间的关联式,建立了环弧段刚度分析模型,用有限元分析程序“APOLANS”计算了环弧段的载荷一位移场静力问题。与原有分析方法相比,精度有显著的提高,相当接近测试刚度,起到了理论分析与测试数据相互校验的作用,并为波形环式弹性支座刚度设计提供了可靠的理论依据。

主题词: 弹性支座 刚度 有限元
分类号: TH11 TB115

1 引 言

现代航空发动机大都采用柔性转子设计^[1]。比如,英国的 Viper 发动机压气机后轴承和涡轮前轴承采用了一种波形环式弹性支座^[2]。用过去已有的几种方法来计算这种弹性支座的刚度,误差都比较大,故工厂常采用实测的方法。显然测试数据需要校验,设计过程中刚度也需要计算,这就是进行波形环式弹性支座刚度数值模拟研究的前提。

把波形环在外凸台之间的区间看作是直梁,可以对带有许多凸台的环进行近似计算,然而此法与实物试验结果不太符合,另外两种方法,一种是针对少量凸台结构,运用材料力学中求解超静定环结构的方法,此法局限于材料力学假设范围;另一种计算方法是将环离散成弹性元件,每一弹性元件视为一个凸台和其相邻两个凸台之间连接的部分环弧段,并将弹性元件作为两端夹持的变截面梁来讨论,假定梁是直线的,这样的近似假定是完全允许的,此法准确度达 30%。文献[1]还提供了一个参考经验计算公式,以上 4 种算法都有局限性,且精度不高。

在本文中,首先分析了波形环刚度与其离散弧段之间的关系,然后用有限元分析程序计算弧段刚度,从而得到了环的刚度,并与制造厂家的波形环刚度测试数据作了比较。

2 波形环刚度及弧段静力有限元分析

根据转轴运动及波形环承载特点,波形环刚度定义为:转轴中心发生单位径向位移时,波形环结构沿位移反方向作用的合力。对于内外表面均匀分布 n (图 1 中 $n=8$) 个凸台的波形环,若轴心沿 $-y$ 方向有单位径向位移 A ,则衬圈、轴承外环(为与轴固连的平面刚体)下移 A ,它们受到波形环下半 $n/2$ 个凸台的支反力 F_i ($i=1, 2, \dots, n/2$) 作用,将波形环视为以外环表面凸台中线为界的 n 个环弧段的组合,则波形环下半相应 $n/2$ 个弧段中央表面凸台处的径向变形为: $A_i = A \cos(\beta_i)$ 。式中, β 为各弧段方位角(图 1), $i=1, 2, \dots, n/2$ 。

一般地, 由波形环结构的对称性可知其各弧段均有相同的刚度 k , 于是各弧段的支反力为: $F_i = k\Delta i = kA \cos(\beta_i)$ 。式中, k 表示使弧段中央产生单位径向位移所需径向载荷, 单位为 N/m , 弧段两端没有转角, 处理成支持边。由前述定义, 波形环总体刚度为:

$$K = \sum_{i=1}^{n/2} F_{iy} / A = \sum_{i=1}^{n/2} k \cos^2(\beta) \tag{1}$$

式中: F_{iy} 表示 F_i 沿 y 方向的分力。

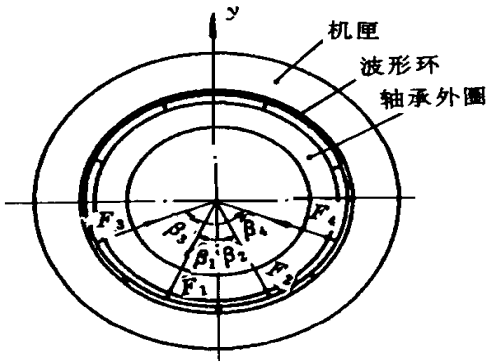


图 1 波形环刚度分析

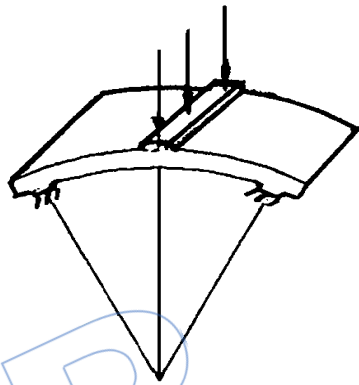


图 2 离散环弧段力学模型

由上述分析可知: 波形环刚度计算归结为求解其离散的弧段的刚度。在以往的计算中, 把弧段处理成直梁、两端支持变截面梁的力学模型与真实情况相差很大, 本文将弧段处理成两端支持、中央受法向载荷的微曲薄板(图 2), 此模型更接近实际。

某型发动机采用了内外表面各均匀分布 10 个凸台的波形弹性环, 其几何、材料特性参数如下: 环平均直径 $\Phi = 94.5 \text{ mm}$; 环平均半径 $R = 47.25 \text{ mm}$; 环厚度 $T = 1.25 \text{ mm}$; 环承载宽度 $B = 18 \text{ mm}$; 弹性模量 $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$; 泊松比 $\nu = 0.3$ 。

为求解图 2 所示的结构静力问题, 用有限元分析程序“APOLANS”进行求解^[3]。

波形环弧段为圆柱形薄壳(壳体厚度与曲率半径之比 $T/R = 1.25/47.25 = 0.026455$), 可选用“APOLANS”中的简单的四结点壳元。四结点壳元的每一个中面结点有 3 个参照于整体坐标系的平移自由度 u, v, w 及 3 个转动自由度 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 。参考图 3, 将环弧用四边形壳元离散成 20 个单元, 以 30 个节点连接整个结构, 再进行下面的载荷与边界条件处理: (1) 中间 4 个单元(图 3 阴影所示)受法向分布载荷 q ; (2) 所有节点绕 z 轴的转角 $\theta_z = 0$; (3) AB 边、 CD 边上的 10 节点 $w = 0$, AB 边中间节点 $u = 0, v = 0$, CD 边中间节点 $u = 0$ 。

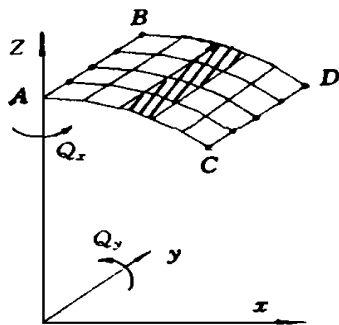


图 3 离散节点及单元

然后填写结构静力分析输入数据卡, 输出数据处理后得到环弧段刚度: $k = 7.5033 \times 10^6 \text{ N/m}$, 于是波形环刚度 $K_a = 1.8758 \times 10^7 \text{ N/m}$ 。

3 计算结果比较

前面用有限元方法分析了有 10 个凸台的波形环刚度, 某发动机制造厂进行了波形弹性环

刚度测试,测试采用了专门的试验台,仿照弹性环及衬圈的实际工作条件,通过加载、测试变形量的方式测出了波形弹性环的刚度。

表 1 中,求平均刚度 K_{ta} 时,考虑到波形环与衬圈之间有 0.02–0.04 mm 的间隙,加载 $P = 161\text{ N}$ 时,变形量仅为 0.01 mm,衬圈与波形环没有完全接触上,所以第一个刚度值 K_1 带有间隙造成的误差,在计算中去掉,由 K_2, K_3, K_4 取平均值得到 $K_{ta} = 1.809 \times 10^7\text{ N/m}$ 作为测试刚度。有限元分析与测试结果之间的误差: $\Delta_k^a = [(K_a - K_{ta}) / K_{ta}] \times 100\% = 3.69\%$

表 1 波形环刚度测试数据及处理

载 荷(N)	161	523	886	1248	1610
平均变形量(μm)	10.65	32.15	52.80	71.85	92.30
刚度 $K_i(i = 1, 4)$ (N/m)	1.684	1.758	1.900	1.770	$\times 10^7$
平均刚度 K_{ta} (N/m)	1.809×10^7				

对于算例,用有限元方法计算波形弹性环的刚度,可以获得较高的精度。为弄清影响弹性环刚度的主要因素,在有限元分析中改变环厚度进行计算,结果如下:厚度 $T_b = 1.25\text{ mm}$; $T_c = 1.20\text{ mm}$; 厚度差 0.05 mm; 厚度相对差 4%; 刚度差 $0.211\text{E}7\text{ N/m}$; 刚度相对差 11.26%。可以看出,波形环厚度是影响其刚度主要因素之一,在加工中应严格控制其制造公差。

4 结 论

(1) 波形弹性环与其离散环弧段关联式为文中式(1); (2) 将离散环弧段处理成两端支持的圆柱薄壳是对实际结构的更好逼近,用有限元方法求解环刚度有效且精度比较高; (3) 波形环式弹性支座刚度的数值模拟具有校验测试数据的作用,并且为刚度设计提供了可靠的理论依据; (4) 影响波形环刚度的主要因素之一是环的厚度,在加工中应严格控制其制造公差; (5) 理论计算与测试结果的误差表明:在获取支承刚度这一转子动力学重要边界条件时,有必要设计专门的实验台实测波形环的刚度。

参 考 文 献

1 顾家柳等. 转子动力学. 北京: 国防工业出版社, 1985
2 晏砺堂. 航空燃气轮机振动和减振. 北京: 国防工业出版社, 1991
3 傅子智等译. 工程中的有限元法. 科学出版社, 1991

(责任编辑 魏星禄)

INFLUENCE OF TIP CLEARANCE ON AERODYNAMIC- AEROACOUSTIC PERFORMANCE OF SKEWED- SWEPT ROTATING BLADES

Cai Na

(Dept. of Power Energy Engineering, North China University of Electric Power 100085)

Li Di and Zhong Fangyuan

(2nd Dept. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

ABSTRACT

Noise characteristics of tip clearance in a fan and engineering aerodynamic- aeroacoustic performance are obtained from skewed- swept rotating blades. Two methods of tip clearance modification have been carried out: (1) Experimental results are applied to decreasing the radial tip clearances of the rotating blades, thereby the aerodynamic efficiency increases about 3- 4 percent, the average noise is reduced by 2- 3 dB (A), and the steady working margin is widened over 20 percent; (2) Aerodynamic- aeroacoustic characteristics are calculated with a revised formula.

Key Words Axial fans Blades Clearance Aerodynamic Characteristics Acoustic properties

NUMERICAL SIMULATION FOR STIFFNESS OF FLEXIBLE WAVY RING SUPPORT

Liu Fangjie

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Liu Rongqiang

(8th Dept. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Dai Xingjian

(Physics Eng. Dept. Tsinghua University, Beijing 100084)

ABSTRACT

The numerical simulation for the stiffness of a flexible wavy ring support is presented. The relationship that connects the support stiffness of the wavy ring to that of the ring's separated arc segment is found out. A stiffness analysis model of the segment is set up and the displacement field of the segment under a normal load is solved by using the finite element program "APOLANS". The stiffness analysis results are compared with the test data obtained from stiffness measurement in a factory in good agreement. This study provides an analytical method for the design of flexible wavy ring support.

Key Words Elastic supports Rigidity Finite elements

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON VIBRATION OF A ROTOR WITH THERMAL BOW

Hu Bigang and Ren Pingzhen

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Feng Guoquan

(Shenyang Aeroengine Institute, Shenyang 110015)

ABSTRACT

In order to investigate the vibrational response of a turbine rotor with thermal bow, a test rig simulating the rotor was set up, on which the temperature field and the thermal deformation of the rotor were measured. The critical speed of the rotor and response to the thermal bow were investigated. The experimental data are in good agreement with results calculated by means of the transfer- matrix method.

Key Words Turbines Rotors Thermal strength Flexural vibration