

文章编号:1000-8055(2011)01-0199-05

鼠笼式弹性支承结构参数优化设计与试验

冯国全^{1,2}, 周柏卓²

- (1. 大连理工大学 机械工程学院, 大连 116024;
2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 进行了鼠笼式弹性支承的优化设计与试验研究. 基于遗传算法和 MATLAB 开发了优化设计软件, 进行了某航空发动机鼠笼式弹性支承的结构参数优化设计, 并进行了柔度试验和疲劳应力试验. 结果表明, 疲劳应力下降到原来的 40%, 优化结果与试验结果的误差小于 6%, 验证了优化设计的有效性.

关 键 词: 航空发动机; 鼠笼式弹性支承; 优化设计; 支承柔度; 整机振动; 参数化设计

中图分类号: V231.92

文献标识码: A

Optimization design and test investigation of squirrel cage elastic support

FENG Guo-quan^{1,2}, ZHOU Bai-zhuo²

- (1. School of Mechanical Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Shenyang Aeroengine Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Optimization design and test investigation of a squirrel cage elastic support was performed. An optimization software, which is used to achieve structure parameters optimization of squirrel cage elastic support of an engine, was developed based on the genetic algorithms and MATLAB. The test of flexibility and stress was accomplished. The results indicate that the fatigue stress is decreased to approximately 40% of the original scheme, the errors between the optimization and test results are less than 6%, so the optimization design is validated.

Key words: aero-engine; squirrel cage elastic support; optimization design; support flexibility; engine vibration; parametric design

现代发动机的转子-支承系统日益趋于柔性化, 对转子的不平衡量极其敏感, 整机振动问题十分突出, 成为严重影响发动机可靠性的重大问题^[1-3]. 为了使发动机具有先天优良的振动特性, 目前普遍的作法是采用带有弹性支承的转子方案^[2-8]. 发动机研制的工程实践表明, 弹性支承典型的故障模式是疲劳破坏. 整体加工的鼠笼式弹性支承由于存在较大的应力集中, 容易出现疲劳

裂纹, 甚至笼条断裂, 从而造成灾难性事故. 因此弹性支承的疲劳问题引起工程界和学术界的高度关注^[2-11].

目前, 参数化设计特别是通用软件中的参数化建模和计算模块已经日趋成熟, 参数化计算方法在汽轮机转子、曲轴等的建模分析多个方面得到了广泛应用^[12-14], 但应用于发动机弹性支承的优化设计还不成熟.

收稿日期: 2009-12-07; 修订日期: 2010-09-01

作者简介: 冯国全(1967—), 男, 辽宁北票人, 研究员, 博士生, 主要从事航空发动机及燃气轮机整机振动设计研究.

遗传算法作为一种新兴优化算法,具有以下优点:①在搜索过程中不易陷入局部最优解,即使在所定义的目标函数非连续、不规则和伴有噪声的情况下,也能以极大的概率找到全局最优解。②由于遗传算法固有的并行性,使得它非常适合于大规模并行分布处理。③该算法易于和别的技术(如神经网络、模糊推理、混沌行为和人工生命等)相结合,形成性能更优的问题求解方法。近年在发动机涡轮轮盘设计、曲轴减振器设计等方面得到了广泛应用^[15-22]。

以往弹性支承设计多取决于设计人员的经验,具有试凑性质,不同方案的疲劳强度差别很大,难以同时满足柔度和疲劳强度的要求。本文采用了考虑鼠笼式弹性支承各笼条截面主弯曲方向与笼条受力方向不平行特点的强度、柔度的参数化计算方法,并结合遗传优化算法进行了某型发动机鼠笼弹性支承的结构优化设计,使疲劳应力下降到原来的40%,大幅度提高了疲劳强度储备,并通过支承柔度试验和疲劳应力试验,验证了优化设计的有效性。该方法已应用在多个型号发动机和燃气轮机设计中。

1 鼠笼式弹性支承的结构设计简介与参数化计算

典型的鼠笼式弹性支承如图1所示,在金属套筒上铣削加工成若干笼条,通过改变笼条的长度、宽度、壁厚和笼条数量来调整柔度,从而调整临界转速、降低振动响应。

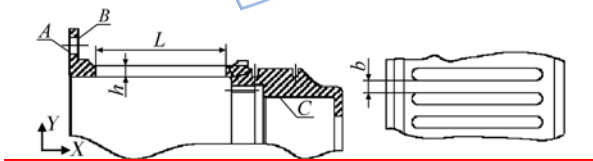


图1 弹性支承结构简图

Fig. 1 Sketch map of elastic support

文献[2-3,6,11]给出了鼠笼式弹性支承参数化的强度、柔度计算方法,柔度和疲劳应力值按以下公式计算:

$$\delta = \frac{L^3}{NEb^2h^2} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{3Ebu}{L^2} \quad (2)$$

式中 L 为笼条长度, N 为笼条数, b 为笼条宽度, h 为笼条厚度, u 为变形量, E 为弹性模量, σ 为疲劳应力, δ 为柔度。如假设位移方向垂直向上,则最

大应力发生在两侧的笼条上。

在工程实践中,多次发现该方法的分析结果与有限元法分析和试验不一致。在笼条为正方形截面时,柔度差别尚可接受,但疲劳应力差别较大;在笼条采用矩形截面时,柔度和疲劳应力差别都很显著,尤其是最大应力并非发生在两侧的笼条。因此,本文采用了考虑各笼条截面主弯曲方向与笼条受力方向不平行特点的柔度、疲劳应力参数化计算方法^[24]。

$$\delta = \frac{2L^3}{NEbh(h^2 + b^2)} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{3Eu\sqrt{h^2 + b^2}}{L^2} \quad (4)$$

2 鼠笼式弹性支承的优化设计的数学问题提法

弹性支承优化设计的目的是希望在结构空间允许的范围,通过优化配置笼条的长度、宽度、壁厚和笼条数量,使弹性支承在同时满足转子振动特性要求柔度值的前提下,具有最低的疲劳应力(即最大的疲劳强度储备),从而实现调整临界转速、改善发动机振动特性的目的。

一般而言,航空发动机结构件还要求结构质量最小,由公式(3),(4)可得笼条部分的结构质量为

$$m = \rho NLbh = \frac{18Eu^2\rho}{\sigma^2\delta} \quad (5)$$

由于支承柔度 δ 为确定值,所以笼条的总质量与最大应力的平方成反比,可见两者难以同时达到最佳,同时笼条部分的质量占整个弹性支承的比例不大,工程实践中不同方案间笼条部分质量的差别小于0.2 kg。为简便起见,建立弹性支承优化设计数学模型如下。

目标函数:笼条的疲劳应力最小,即

$$\sigma = \frac{3Eu\sqrt{h^2 + b^2}}{L^2}$$

取得最小值。

设计变量:笼条长度 L , 笼条数 N , 笼条宽度 b , 笼条厚度 h 。

约束条件:鼠笼的支承柔度等于转子动力学设计要求柔度值的等式约束,即

$$\delta = \frac{2L^3}{NEbh(h^2 + b^2)} = \delta_{\text{design}}$$

设计变量的取值范围:根据设计经验和空间条件给定。

因此,弹性支承的优化设计问题转化为一个

具有等式约束的多变量、单目标优化问题.

3 某型发动机鼠笼式弹性支承的优化设计

使用基于 MATLAB 的遗传算法软件包,编制了鼠笼式弹性支承优化设计程序.使用拉格朗日乘子法建立新的目标函数,把具有等式约束的单目标优化问题转化为无约束单目标优化问题:

$$L_2(N, b, h, L, \lambda) = \sigma + \lambda \times \text{abs}(\delta - \delta_{0\text{design}}) = \frac{3Eu\sqrt{h^2 + b^2}}{L^2} + \lambda \times \text{abs}\left[\frac{2L^3}{NEbh(h^2 + b^2)} - \delta_{0\text{design}}\right]$$

表 1 优化设计及对比结果

Table 1 Optimization design and results comparison

序号	L/mm	b/mm	h/mm	N	σ /MPa	$\delta/10^{-5}$ (mm/N)	m/kg
1	29	4.0	1.25	8	562	6.0	0.11
2	45	5.67	2.0	36	220	6.0	0.14
3	42	5.26	2.0	36	237	6.0	0.12
4	42	4.19	3.0	36	216	6.0	0.15
5	33	3.0	3.0	36	288	6.0	0.08
6	45	3.78	3.78	36	196	6.0	0.18
7	45	3.52	3.5	48	182	6.0	0.20
8	45	4.5	3.0	36	198	6.0	0.17

考虑到上述参数化计算方法无法考虑一些结构细节(如笼条根部圆角、两端圆环的柔性等),使用 ANSYS 进行了选定方案的三维有限元分析.结果见图 2~图 3,最大应力为 194.7 MPa,支承柔度为 6.35×10^{-5} mm/N,最大应力的笼条与位移夹角为 56.17° . 结果与方案优化设计基本一致,优化设计取得了很好的效果.

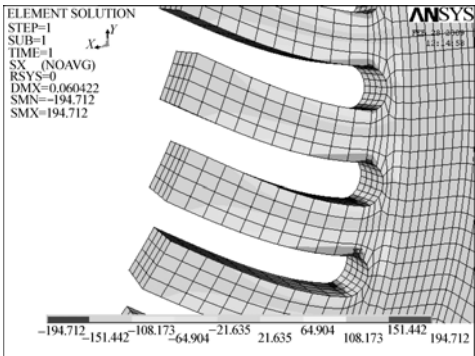


图 2 弹性支承的应力分布(单位:MPa)
Fig. 2 Stress distribution map of elastic support (unit:MPa)

其中设计变量的取值范围根据结构空间的限制取定为 $L \in [20, 45](\text{mm})$, $N \in [24, 60]$, $h \in [3, 6](\text{mm})$, $b \in [3, 6](\text{mm})$, $\delta_{0\text{design}} = 6.0 \times 10^{-5}$ mm/N.

由于结构空间的限制和工艺的需要,数学上的最优方案未必就是工程上可实现的最优方案,因此将算法给出的多个候选方案都列在表 1 中,其中序号 1 为优化前方案.考虑到加工工艺性及与其他尺寸的匹配,最终选定了序号 8 的方案,支承柔度满足规定的要求,最大应力为 198 MPa,低于设计允许值 200 MPa,最大应力的笼条与位移方向夹角为 56.31° .

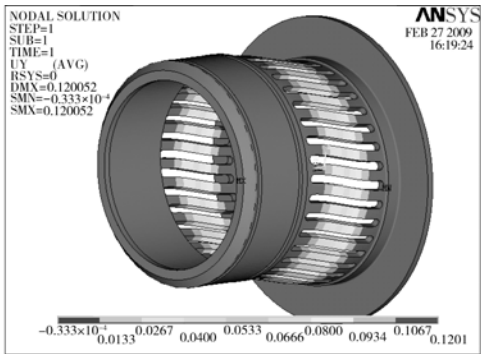
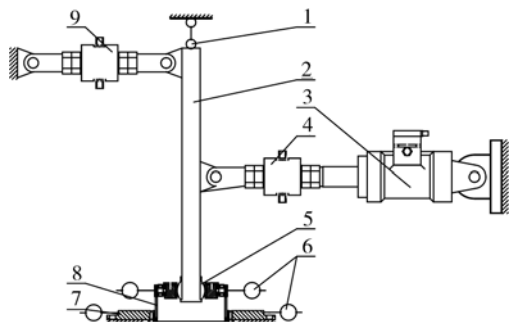


图 3 弹性支承的变形图(单位:mm)
Fig. 3 Displacement distribution map of elastic support (unit:mm)

4 鼠笼式弹性支承的柔度与应力试验

进行了某型发动机鼠笼式弹性支承柔度与应力测量试验,试验装置示意图 4,应变片贴片位置见图 5,试验装置照片见图 6.

试验件 8 通过固定板 7 固定在基础平台上,用伺服作动筒 3、测力计 4 和加载杆 2 通过关节



1 可调吊点; 2 加载杆; 3 伺服作动筒; 4 测力计; 5 关节轴承;
6 千分表; 7 固定板; 8 试验件; 9 测力计

图4 试验装置示意图

Fig. 4 Sketch of test

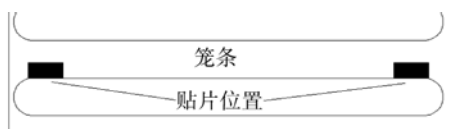


图5 笼条贴片位置图

Fig. 5 Sketch of strain gauge location

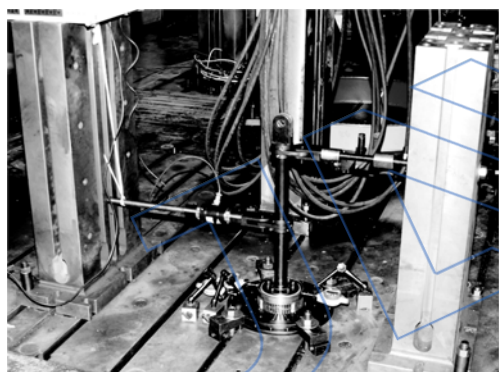


图6 试验装置照片

Fig. 6 Photograph of test

轴承5对试验件加载,测力计4和9的差值就是施加到试验件上的力值,用千分表6测量试验件的变形,用8个应变片测量笼条根部应力.试验重复加载3次,柔度测量曲线见图7.

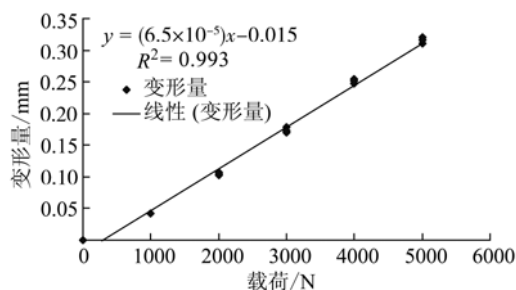


图7 柔度测量曲线

Fig. 7 Graph of flexibility test

表2的结果表明,优化结果及有限元计算结果与试验的差别小于6%,用于优化设计的参数化计算方法具有足够的精度.

表2 柔度与应力试验与计算结果对比

Table 2 Computation and test results comparison of flexibility and stress

项目	$\delta/10^{-5}(\text{mm/N})$	σ/MPa	试验误差/%
优化计算	6.0	198	5.3
有限元计算	6.35	194.7	3.6
试验(平均值)	6.5	188	

5 结论

本文采用考虑笼条非对称弯曲特性的鼠笼式弹性支承柔度和应力的参数化计算方法,结合遗传优化算法,进行了航空发动机鼠笼式弹性支承的结构参数优化设计,大幅度降低了疲劳应力(仅为原方案的40%),优化设计取得了很好的效果.

本文采用的鼠笼式弹性支承柔度和应力的参数化计算方法,经三维有限元分析及试验验证,具有足够的工程精度,其有效性和实用性得到了工程设计实践的验证,可用于航空发动机鼠笼式弹性支承设计,具有较大的推广价值.

参考文献:

- [1] 付才高,周松江.中推核心机在地面试车中的振动特性[J].燃气涡轮试验与研究,1994(1):3-5.
FU Caigao, ZHOU Songjiang. The vibration characteristics of core engine with middle class thrust in ground test[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1994(1): 1-5. (in Chinese)
- [2] 付才高.航空涡喷、涡扇发动机结构设计手册,第19册[M].北京:航空工业出版社,2000.
- [3] 朱梓根.航空涡喷、涡扇发动机结构设计准则(研究报告)第六册 转子系统[R].北京:中国航空工业总公司发动机系统工程局,1997.
- [4] 王四季,廖明夫,杨审记.主动式弹支干摩擦阻尼器控制住转子振动的试验[J].航空动力学报,2007,22(11): 1893-1897.
WANG Siji, LIAO Mingfu, YANG Shenji. Experimental investigation on rotor vibration control by using active elastic support/dry friction dampers[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1893-1897. (in Chinese)
- [5] 付才高.航空发动机设计手册,第19册 转子动力学与整机振动[M].北京:航空工业出版社,1996.
- [6] 徐万孚,温志建,徐礼富.带有弹性支承与挤压油膜阻尼器的高速传动试验台[J].机械工程学报,2004,40(9): 144-147.

- XU Wanfu, WEN Zhijian, XU Lifu. High speed rotating test-bed with flexible squeeze film damped support[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(9): 144-147. (in Chinese)
- [7] 周明, 李其汉, 赵福安. 弹性支承和 PSFD 在中推预研核心机上的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1994(1): 6-13.
ZHOU Ming, LI Qihan, ZHAO Fuan. The application of elastic support and PSDF on pre-research core engine with middle class thrust[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1994(1): 6-13. (in Chinese)
- [8] 黎亮. 弹支及挤压油膜阻尼器在压气机试验件上的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1996(4): 1-7. (in Chinese)
LI Liang. The application of elastic support and SFD in the test of compressor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1996(4): 1-7. (in Chinese)
- [9] 冯国全, 周柏卓, 王娟. 基于整体-局部技术的鼠笼式弹性支承疲劳强度分析[J]. 航空发动机, 2007, 33(4): 22-24.
FENG Guoquan, ZHOU Baizhuo, WANG Juan. Fatigue analysis of squirrel cage elastic support based on global-local technique[J]. Aeroengine, 2007, 33(4): 22-24. (in Chinese)
- [10] 张启文, 刘启州. 航空强度设计试验手册, 第一卷[M]. 北京: 第三机械工业部第六研究院, 1997.
- [11] 王四季, 廖明夫. 弹支局部断裂后主动弹支干摩擦阻尼器对转子的保护[J]. 航空动力学报, 2008, 23(11): 1893-1897.
WANG Siji, LIAO Mingfu. Protection of a rotor against violent vibrations caused by a crack in elastic supports by using active elastic support/dry friction dampers[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(11): 1893-1897. (in Chinese)
- [12] 刘方杰, 刘荣强, 戴兴建. 波形环式弹性支座刚度的测试与数值模拟[J]. 航空动力学报, 1997, 12(1): 26-28.
LIU Fangjie, LIU Rongqiang, DAI Xingjian. Numerical simulation for stiffness of flexible wavy ring support[J]. Journal of Aerospace Power, 1997, 12(1): 26-28. (in Chinese)
- [13] 王璋奇, 安利强, 彭震中. 基于参数化建模的转子有限元剖分[J]. 热能动力工程, 2001, 16(5): 537-539.
WANG Zhangqi, AN Liqiang, PENG Zhenzhong. Finite element meshing of a turbine rotor based on parametric modeling [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001, 16(5): 537-539. (in Chinese)
- [14] 刘荣昌, 薛隆泉, 马淑英. 参数化曲轴三维整体模型与有限元分析系统的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 27-30.
LIU Rongchang, XUE Longquan, MA Shuying. Research on crankshaft FEA system of parametric 3D integral model [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 27-30. (in Chinese)
- [15] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [16] Roth B, Patel C. Application of genetic algorithms in the engine technology selection process[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(4): 693-700.
- [17] Rao A R, Scanlan J P, Keane A J. Applying multiobjective cost and weight optimization to the initial design of turbine disks[J]. Journal of Mechanical Design, 2007, 129(12): 1303-1310.
- [18] Ye S C, Anaspure D A, Williams K A, et al. Use of genetic algorithms to tune vibration dampers for multimode systems with complex periodic inputs[J]. Smart Structures and Materials, 2004, 5386: 478-489.
- [19] 郭海丁, 路志峰. 基于 BP 神经网络和遗传算法的结构优化设计[J]. 航空动力学报, 2003, 18(2): 216-220.
GUO Haiding, LU Zhifeng. Structure design optimization of based on BP neural networks and genetic[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(2): 216-220. (in Chinese)
- [20] 陈艳秋, 朱梓根. 基于遗传算法的航空发动机管路优化设计[J]. 航空动力学报, 2002, 17(4): 421-425.
CHEN Yanqiu, ZHU Zigen. Piping system design of aero-engine using genetic algorithms[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(4): 421-425. (in Chinese)
- [21] Chen T Y, Wang B P. Optimum design of rotor-bearing systems with eigenvalue constraints[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(2): 256-260.
- [22] 李岳峰. 基因遗传优化算法研究及应用探索[J]. 振动工程学报, 1994, 7(4): 313-321.
LI Yuefeng. Exploration and applications of genetic algorithm[J]. Journal of Vibration Engineering, 1994, 7(4): 313-321. (in Chinese)