

基于虚拟正交试验的压气机叶轮轴-毂径向微动特性研究

赵俊生¹, 鹿雪龙¹, 黄新忠², 王双永³

- (1. 中北大学机械与动力工程学院, 太原 030051;
2. 中国航天科工集团第二研究院总装调部, 北京 100854;
3. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

[摘要] 用 Pro/E 建立压气机叶轮轴-毂三维模型, 利用 ANSYS 软件采用子结构结合网格随移技术的分析方法, 建立其有限元模型。采用虚拟正交试验方法对压气机叶轮轴-毂进行仿真, 得出过盈量、摩擦系数、转速对最大单位摩擦功和平均摩擦功影响显著性次序及影响规律, 得到最优组合。结果表明, 模拟及正交试验优化结果准确、可靠, 有效地降低了摩擦磨损程度, 对实际装配过程具有一定的指导作用。

关键词: 压气机叶轮轴-毂; 径向微动; 有限元法; 虚拟正交试验

Radial Fretting Characteristic Research on Compress Impeller Spindle-Hub Based on Virtual Orthogonal Experiment

ZHAO Junsheng¹, LU Xuelong¹, HUANG Xinzhong², WANG Shuangyong³

- (1. School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Final Assembly and Debugging Department of the 2nd Academy, CASIC, Beijing 100854, China;
3. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

[ABSTRACT] A three-dimensional model of a compressor impeller is set up by Pro/E. Based on the ANSYS, the finite element model is established by using the analysis method of combining submodule and ParaMesh. The compressor impeller spindle-hub is simulated by virtual orthogonal design optimization method. The influence significance order and laws of interference, friction coefficient and rotation speed on the maximum unit friction work and average friction work, and the optimized parameters are obtained. The verifying experiment shows that the results of the numerical simulation and orthogonal experiment are accurate and reliable, and the friction and wear is effectively reduced, and certain guiding references to actual assembly process are got.

Keywords: Compressor impeller spindle-hub; Radial fretting; Finite element method; Virtual orthogonal experiment

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.07.106

微动广泛存在于承受机械振动、疲劳载荷、冷热循环等工况的紧配合件中^[1]。微动造成构件材料的损伤, 加速裂纹的萌生和扩展, 已成为一些关键零部件失效的主要原因之一。涡轮增压器压气机叶轮的破坏主要是由裂纹扩展引起的, 而研究发现该裂纹的形成正是由于微动磨损^[2]。压气机叶轮是涡轮增压器的重要部件, 一般采用过盈配合压装在叶轮轴上。压气机叶轮的工作转速比较高, 目前普遍使用的涡轮增压器转速范围为 60000~120000r/min^[3], 最高转速可达 260000r/min。摩擦功是摩擦应力与对应滑移距离的乘积, 是衡量摩擦磨损程度严重与否的重要参数。本文通过研究过盈量、摩擦

系数和转速等工作参数对微动特性参数的影响, 找出它们之间的数值关系, 以期为压气机叶轮的装配工艺提供理论依据, 对实践进行指导。

1 数值模拟

1.1 试验对象

以某型车用涡轮增压器的压气机叶轮为例进行计算, 如表 1 所示。该叶轮由两个部分组成: 进气处的旋转导向部分和带径向叶片的叶轮部分。该型叶轮沿周向均匀分布 12 个叶片。叶轮的材料为铸铝, 轴的材料为 45 钢^[3]。

表1 叶轮主要参数

叶轮半径 r/mm	轴径 d/mm	叶轮轴向宽度 L/mm	叶片数目 Z	工作转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
30	6	26	12	90000~120000

1.2 模型的建立

由于压气机叶轮轴-毂为周期循环对称,根据有限元接触分析的理论,可以采用子结构分析方法,只分析其中1个周期即可。叶轮与轴沿周向可以分为6个子结构,即 60° 为1个旋转周期,应用Pro/E建立其中1个子结构的三维模型,然后导入ANSYS中,采用子结构结合网格随移技术的分析方法,针对不同过盈量、转速和摩擦系数进行大量计算。子结构的三维模型如图1所示,划分网格后的子结构如图2所示。

本文采用Solid185单元,在综合考虑计算效率和计算精度的基础上,选择单元长度为0.8mm,将压气机叶轮轴孔的内表面、轴的外表面沿轴向划分为44个网格,沿周向划分为6个网格。采用网格随移技术只需对轴的半径进行偏移即可得到不同过盈量下的有限元过盈接触分析模型,可以大大节约前处理时间。

1.3 工作参数的选取

1.3.1 过盈量

对于压气机叶轮轴-毂过盈联接装配方式,叶轮通常以一定的过盈量压装在转轴上,靠接触摩擦来传递转矩。当摩擦面间的摩擦应力小于摩擦系数 μ 与接触压力的乘积时,轴毂之间处于粘着区;当摩擦面间的摩擦应力等于摩擦系数 μ 与接触压力的乘积时,轴毂之间产生相对滑移,处于滑移区。离心力变化将引起叶轮轴-毂的径向微动,不同的过盈量对接触压力的影响很大。过盈量太小,叶轮与轴-毂接触不牢靠,从而造成

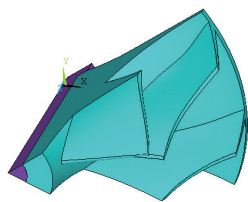


图1 子结构三维模型

Fig.1 Substructure of the 3D model

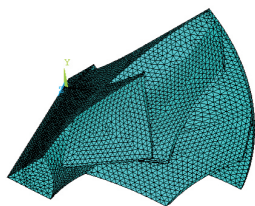


图2 网格化子结构

Fig.2 Meshed substructure

增压器的工作事故;过盈量太大,从而会使叶轮应力过高,在装配时有可能使叶轮结构破坏,进而影响到增压器的寿命^[4]。为了研究过盈量对压气机叶轮轴-毂径向微动特性的影响规律,本文选取的过盈量取值分别为0.006mm、0.007mm、0.008mm、0.009mm。

1.3.2 摩擦系数

摩擦力也是影响接触面表层切向应力的一个重要因素,对接触表面微裂纹的生成和扩展起推动作用,最终会导致结构疲劳寿命下降。在接触载荷确定的情况下,摩擦力大小与摩擦系数成正比。摩擦系数不仅影响接触表面间的摩擦应力和滑移距离,还影响摩擦功和微动区域的划分。为了研究摩擦系数对压气机叶轮轴-毂径向微动特性的影响规律,本文选取的摩擦系数分别为0.10、0.15、0.20、0.25。

1.3.3 转速

转速是施加在压气机叶轮轴-毂装配体上的外载。在一定过盈量下,压气机叶轮旋转过程中由于转速不稳定,沿径向产生的离心力大小会发生变化。变化的离心力会引起接触面间滑移距离的变化,从而导致接触面间发生微动。总之,对于实际的叶轮轴-毂装配体,转速的变化会直接导致叶轮微动的发生^[5]。为了研究转速对压气机叶轮轴-毂径向微动特性的影响规律,本文选取的转速分别为90000r/min、100000r/min、110000r/min、120000r/min。

1.3.4 其他参数

本文仅分析叶轮轴-毂径向微动特性,并没有考虑扭矩作用引起的叶轮轴-毂切向微动磨损,因此没有涉及叶轮轴与轴肩由于离心力引起的切向微动磨损特性,扭矩作用引起的扭转微动磨损特性,增压器叶轮转速的变化、加载频率等参数对轴-毂复合微动特性的影响规律也需要考虑。

2 方案确定及目标函数选取

2.1 方案确定

本文的研究对象包括过盈量、摩擦系数、转速3个因素,每个因素选取4个水平数^[6-7]。选用L16(4³)正交表,如表2所示。

2.2 目标函数选取

微动不仅会造成接触表面的摩擦磨损,还可以促进裂纹的萌生与扩展,降低零部件的疲劳寿命。在微动区域内,不断变化的摩擦功会导致微动磨损与裂纹萌生。

由压气机叶轮的结构可知,压气机叶轮本身的质量沿轴向有较大的梯度,在工作过程中压气机叶轮质量越大沿着径向的离心力相应也越大。在相同转速下,质量

较大的一侧受到的离心力大,可以在一定程度上减小压气机叶轮与转子轴之间的挤压作用,相应的接触面间的接触压力会较小。接触压力沿轴向按一定的规律分布。

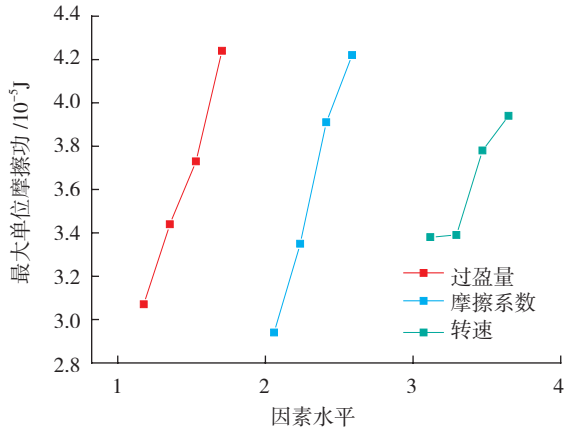


图3 不同参数对最大单位摩擦功的影响

Fig.3 Influence of different parameters on maximum unit friction work

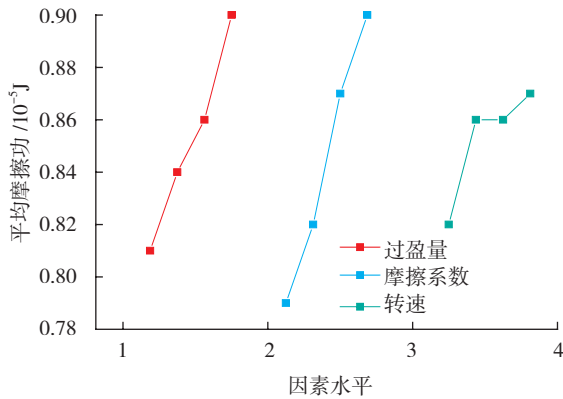


图4 不同参数对平均摩擦功的影响

Fig.4 Influence of different parameters on average friction work

本文分别选取最大单位摩擦功的最小值和平均摩擦功的最小值作为分析和优化的目标函数。

3 结果与讨论

3.1 因素显著性分析

由如表 2 模拟的结果分析可得数据最大单位摩擦功和平均摩擦功极差分析表,如表 3 和表 4 所示。

表 3 的极差结果显示, $R_{\text{摩擦系数}} > R_{\text{过盈量}} > R_{\text{转速}}$,即对最大单位摩擦功最小值的影响显著性为摩擦系数最大,过盈量次之,转速最小。

表 4 的极差结果表明, $R_{\text{摩擦系数}} > R_{\text{过盈量}} > R_{\text{转速}}$,3 个因素中摩擦系数对平均摩擦功最小值影响最为显著,其次过盈量,而转速影响最不显著。

3.2 参数对目标函数的影响规律

(1)不同参数对最大单位摩擦功的影响见图 3。可见,过盈量、转速和摩擦系数增大时,最大单位摩擦功呈现出增大的趋势,只是增大的程度不同。

(2)不同参数对平均摩擦功的影响见图 4。可见,过盈量、转速和摩擦系数增大时,平均摩擦功也呈现出增大的趋势,只是增大的程度不同。

3.3 参数优化

由于本文研究的目标函数有 2 个,因此对工艺参数的优化采用综合平衡法,即分别对各个指标进行分析,找出各个指标的最优水平,然后将各个指标的最优条件综合平衡,找出兼顾每个指标都尽可能好的条件。

由表 3 和表 4 可以看出,4 个因素对单个目标函数最佳组合为最大单位摩擦功: 过盈量水平 1、摩擦系数水平 1、转速水平 1; 平均摩擦功: 过盈量水平 1、摩擦系数水平 1、转速水平 1。

表2 正交设计方案

编号	过盈量 /mm	摩擦系数	转速 / (r · min ⁻¹)	空因素	空因素	最大单位摩擦功 /10 ⁻⁵ J	平均摩擦功 /10 ⁻⁵ J
1	0.006	0.10	90000	1	1	2.36	0.71
2	0.006	0.15	100000	2	2	2.38	0.72
3	0.006	0.20	110000	3	3	3.52	0.83
4	0.006	0.25	120000	4	4	4.02	0.87
5	0.007	0.10	100000	3	4	2.49	0.78
6	0.007	0.15	90000	4	3	2.88	0.79
7	0.007	0.20	120000	1	2	4.13	0.88
8	0.007	0.25	110000	2	1	4.27	0.90
9	0.008	0.10	110000	4	2	3.01	0.81
10	0.008	0.15	120000	4	3	3.84	0.86
11	0.008	0.20	90000	1	2	3.75	0.85
12	0.008	0.25	100000	2	1	4.32	0.91
13	0.009	0.10	120000	4	2	3.89	0.86
14	0.009	0.15	110000	3	1	4.31	0.91
15	0.009	0.20	100000	2	4	4.23	0.90
16	0.009	0.25	90000	1	3	4.53	0.92

表3 最大单位摩擦功极差分析表

最大单位摩擦功 最小值/ 10^{-5} J	影响因素		
	过盈量	摩擦系数	转速
K_1	12.28	11.75	13.52
K_2	13.37	13.36	13.54
K_3	14.92	15.63	15.11
K_4	16.96	16.89	15.57
k_1	3.07	2.94	3.38
k_2	3.44	3.35	3.39
k_3	3.73	3.91	3.78
k_4	4.24	4.22	3.94
极差 R	1.17	1.28	0.56

注: K 是极差分析中的一个值, k 是 K 除以水平数的平均值, 通过 k 来算极差 R 。

表4 平均摩擦功极差分析表

平均摩擦功最 大值/ 10^{-5} J	影响因素		
	过盈量	摩擦系数	转速
K_1	3.23	3.16	3.27
K_2	3.35	3.28	3.45
K_3	3.43	3.48	3.45
K_4	3.59	3.60	3.47
k_1	0.81	0.79	0.82
k_2	0.84	0.82	0.86
k_3	0.86	0.87	0.86
k_4	0.90	0.90	0.87
极差 R	0.09	0.11	0.05

上述最佳组合的过盈量都为 1 水平, 故过盈量取 1 水平; 上述最佳组合的摩擦系数都为 1 水平, 故摩擦系数取 1 水平; 上述最佳组合的转速都为 1 水平, 故转速取 1 水平。

综合以上分析可得, 径向微动特性参数优化组合为过盈量水平 1、摩擦系数水平 1、转速水平 1, 即过盈量 0.006mm、摩擦系数 0.1、转速 90000 r/min。

该组合是 1 号试验组合, 其最大单位摩擦功为 2.36×10^{-5} J, 小于其他几组试验, 且平均摩擦功也是最小的。由此可见, 优化后的工艺参数组合是可信的, 不仅有效地降低了摩擦磨损程度, 而且减轻了压气机叶轮与转轴之间的挤压作用, 从而降低了接触面间的接触压力^[8-10]。

4 结论

(1) 摩擦系数是影响压气机叶轮轴-毂过盈联接装配方式摩擦磨损程度的重要因素, 对最大单位摩擦功和平均摩擦功的影响最大; 过盈量次之; 转速最小。

(2) 虚拟正交试验结果显示, 过盈量、转速和摩擦系数增大时, 最大单位摩擦功和平均摩擦功均呈现出增

大的趋势, 只是增大的程度不同。

(3) 压气机叶轮轴-毂过盈联接装配方式微动特性参数优化组合: 过盈量 0.006mm、摩擦系数 0.1、转速 90000 r/min。

参考文献

- [1] 周仲荣, VINCENT L. 微动磨损 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. ZHOU Zhongrong, VINCENT L. Fretting wear[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [2] 黄新忠, 赵俊生. 压气机叶轮过盈配合研究及合理过盈量的确定 [J]. 机械设计与制造, 2012, 4(4): 24-26.
- [3] 黄新忠. 压气机叶轮轴-毂接触数值分析及微动特性研究 [D]. 太原: 中北大学, 2012.
- [4] HUANG Xinzong, ZHAO Junsheng. Study on the interference fit of compressor impeller and the determination of a reasonable amount of interference[J]. Machine Design and Manufacture, 2012, 4(4): 24-26.
- [5] 黄新忠. 压气机叶轮轴-毂接触数值分析及微动特性研究 [D]. 太原: 中北大学, 2012.
- [6] HUANG Xinzong. Contact numerical analysis and fretting character research on shaft-hub of compressor impeller[J]. Taiyuan: North University of China, 2012.
- [7] 魏志明, 谭建松, 张自明, 等. 微动磨损对发动机机体可靠性的影响及研究 [J]. 车用发动机, 2006, 4(2): 56-58.
- [8] WEI Zhiming, TAN Jiansong, ZHANG Ziming, et al. The research of fretting wear influence on the reliability of the engine block[J]. Vehicle Engine, 2006, 4(2): 56-58.
- [9] 张洪武, 廖爱华, 吴昌华. 增压器压气机三体接触问题的研究 [J]. 内燃机学报, 2006, 5 (42): 81-86.
- [10] ZHANG Hongwu, LIAO Aihua, WU Changhua. A Study on contact problems of turbocharger's compressor[J]. Transactions of CSICE, 2006, 5 (42): 81-86.
- [11] 冯志刚, 樊文欣, 赵俊生, 等. 基于正交试验的连杆衬套强力旋压成形分析 [J]. 热加工工艺, 2014(7): 100-103.
- [12] FENG Zhigang, FAN Wenxin, ZHAO Junsheng, et al. Forming analysis of power spinning of connecting rod bushing based on virtual orthogonal experiment[J]. Hot Working Technology, 2014(7): 100-103.
- [13] 王志伟, 樊文欣, 冯志刚, 等. 基于正交试验的连杆衬套力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2014(3): 104-106.
- [14] WANG Zhiwei, FAN Wenxin, FENG Zhigang, et al. Study on mechanical properties of connecting rod bushing based on orthogonal test[J]. Hot Working Technology, 2014(3): 104-106.
- [15] 张洪武, 廖爱华, 吴昌华. 压气机过盈配合的弹塑性有摩擦接触的研究 [J]. 工程力学, 2007, 24(1): 186-191.
- [16] ZHANG Hongwu, LIAO Aihua, WU Changhua. Study on elastoplastic frictional contact problem in interference fits of compressors[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(1): 186-191.
- [17] 廖爱华. 增压器的非线性力学分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [18] LIAO Aihua. Nonlinear mechanics analysis of turbocharger [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [19] 杨丽丽, 谢春萍, 苏旭中, 等. 紧密塞络纺棉纱关键影响因素的优化设计 [J]. 纺织科技进展, 2007(1): 27-28.
- [20] YANG Lili, XIE Chunping, SU Xuzhong. The optimization design of the key factors in plug tightly winding spun yarn[J]. Progress in Textile Science, 2007(1): 27-28.

(责编 古京)