

文章编号: 1000-8055(2009)04-0825-05

槽式处理机匣几何结构参数的正交试验

吴艳辉, 张皓光, 楚武利, 邓文剑
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 针对一亚声速单级轴流压气机试验台, 根据正交试验的要求设计了 9 种周向槽机匣处理结构. 以其为载体系统地研究了槽式机匣几何结构参数对其扩稳效果的影响. 正交实验结果表明: 在两种换算转速下无需对所用可能组合的处理机匣结构进行试验, 使用正交分析方法对试验结果进行分析都能成功预测扩稳效果最好的处理机匣结构型式.

关 键 词: 压气机; 机匣处理; 结构; 正交试验

中图分类号: V231

文献标识码: A

Orthogonal experimental investigation of geometry structure of grooved casing treatment

WU Yan-hui, ZHANG Hao-guang, CHU Wu-li, DENG Wen-jian

(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Nine kinds of circumferential grooved casing treatment structures were designed by the orthogonal experiment's requirement. Optimized experiments of the geometry structure of circumferential groove were performed on a single stage subsonic axial compressor with the nine kinds of circumferential grooved casing treatment structures at two rotor speeds. The results of orthogonal experiments show that the orthogonal experiments are successful. It is not necessary to test all casing treatment of possible combination of structural factors. The structural factors of casing treatment were forecasted successfully by analysis of the orthogonal experimental results with orthogonal analytic method and the subsonic rotor gains the best stall margin improvement with this kind of circumferential grooved casing treatment of possible combination of structural factors at two rotor speeds.

Key words: compressor; casing treatment; structure; orthogonal experiment

周向槽机匣处理在基本不降低压气机原有效率的基础上获得中等程度的裕度增加. 周向开槽具有结构简单, 易于在压气机外壳上进行改装的优点. 文献[1]中所进行的周向槽试验在设计转速下, 其稳定裕度的改进量可达到 13.5% 的量级, 从这一点看值得对该种处理机匣作进一步深入的研究.

针对周向槽机匣处理, 国内外对其进行结构

性优化试验的研究报道很少, 文献[2]虽然详尽探讨了机匣处理的开槽数目、面积比、宽度、轴向位置对扩稳效果的影响, 但对周向槽机匣处理仅分析了开槽数目的影响. 文献[3]在相同槽宽下研究槽数、槽深、处理槽轴向位置对压气机性能的影响. 文献[4]主要分析了周向槽的轴向位置、槽深对扩稳效果的影响. 本项试验中, 参考周向槽机匣传统设计准则, 设计处理机匣时只考虑 3 个因素,

收稿日期: 2008-05-06; 修订日期: 2008-07-09

基金项目: 自然科学基金(50506026); 航空基金(2007ZB53021); 航空科技创新基金(08B53004);

西北工业大学基础研究基金(W018101)

作者简介: 吴艳辉(1972-), 女, 新疆伊犁人, 副教授, 博士, 主要从事叶轮机械气动热力学专业研究

分别为开槽深度,开槽宽度,中心偏移度,每个因素具有 3 个水平.正交试验的目的是找出何种槽深、槽宽和中心偏移度组合的周向槽处理机匣获得最高的失速裕度改进量.

1 实验装置及测量方式

实验是在西北工业大学单级轴流压气机实验台上进行的,实验台由以下主要部分组成:调速直流电机,增速器,压气机实验段,排气段和自动控制的移动式锥体节气阀门.单级轴流压气机的轮毂比为 0.61,展弦比 1.94,叶片数 30,尖部半径为 0.149m,设计转速为 15 200 r/min,设计压比为 1.25,绝热效率 0.92.实验前将静子叶片后移,仅起整流作用,对孤立转子进行实验.对稳态性能的测量采用的测试系统由微型电脑,DAS-20 数据采集板,PRESTON 高精度阻隔放大器,压力探针及扫描阀组成,其中压力测量系统经过系统校正,在每个节气门位置,进、出口均测量 7 个径向位置的总压.测量总性能时,用扭力测功仪测量转子的功耗来计算效率.

2 机匣处理试件的结构

周向槽机匣处理试件的几何尺寸包括槽数、槽深、槽宽及槽片宽等,按经验原则设计不同的周向槽试件.周向槽机匣处理的结构如图 1 所示,通过两个厚度均为 6 mm 的环形垫块(其内外径均与实壁机匣的一样)来改变处理槽轴向位置(中心偏移度,即试验转子叶排中心与处理中心的位置差与叶尖弦长的轴向投影之比,机匣前伸取正值)

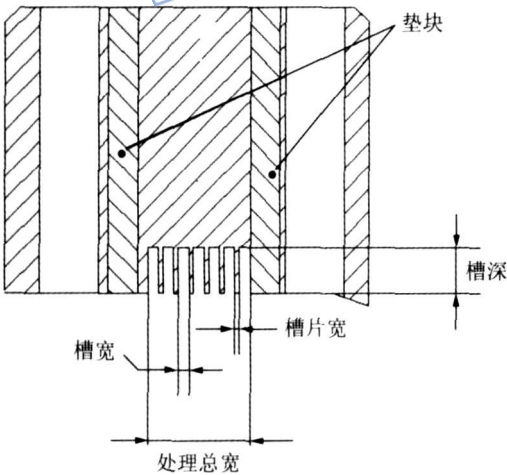


图 1 No. 2 周向槽处理机匣结构简图
Fig. 1 Schematic diagram of No. 2 circumferential groove casing

的位置.叶顶基元的轴向投影宽度约为 18.2 mm.与实壁机匣的一样,各处理机匣试件的叶尖径向间隙均为 0.32 mm.

3 正交试验方案

正交试验设计是用于多因素试验的一种方法,它是从全面试验中挑选出部分有代表的点进行试验,这些代表点具有“均匀”和“整齐”的特点.正交试验设计是部分因子设计(Fractional factorial designs)的主要方法,具有很高的效率.正交设计要求:①任一因素的诸水平作相同数目的试验;②任两个因素的水平组合作相同数目的试验.

正交表是用于安排多因素试验的一类特别的表格,每个正交表有一个代号 $L_n(q^m)$,其含义如下: L 为正交表; n 为试验总数; q 为因素的水平数; m 为表的列数,表示最多能容纳因素个数,正交试验方法的详细介绍见文献[5].

本项试验中,参考周向槽机匣传统设计准则,设计处理机匣时只考虑 3 个因素,分别为开槽深度 H ,开槽宽度 W ,中心偏移度 O ,每个因素具有 3 个水平.根据课题组前期的机匣处理试验经验,认为这 3 个因素交叉影响很小,因此在该正交试验方案及试验结果的分析中忽略各因素之间的交叉影响.正交试验的目的是找出何种槽深、槽宽和中心偏移度组合的周向槽处理机匣获得最高的失速裕度改进量,对应的正交表为 $L_9(3^4)$,如表 1 所示.

表 1 正交试验表
Table 1 Orthogonal experimental matrix

试验号	W/mm	H/mm	O	L/mm
No. 1	2.2	6	0.33	21
No. 2	2.2	9	0	21
No. 3	2.2	12	-0.33	21
No. 4	3.0	6	0	21
No. 5	3.0	9	-0.33	21
No. 6	3.0	12	0.33	21
No. 7	3.75	6	-0.33	21
No. 8	3.75	9	0.33	21
No. 9	3.75	12	0	21

4 试验结果的正交分析

实验在两个换算转速下进行,其相对转速分别为 0.534 和 0.71.在比较各种处理机匣与实壁

机匣下压气机总性能时, 引入稳定裕度改进量指标, 参数定义见文献[6]. 表 2 给出了 8 130 r/min 和 10 765 r/min 两种换算转速下, 9 种处理机匣和实体壁机匣时压气机转子的近失速换算流量 (M_{nps}), 近失速总压比(π_{ts}^*)、峰值效率(η_{M}^*), 以及失速裕度改进量($\overline{m}$) 的数值.

4.1 8130r/min 转速下实验结果的正交分析

9 次试验结果中以第 2 次试验的裕度改进量最高为 8.25%, 相应的水平组合 $W1H2O2$ ($W1=2.2\text{ mm}$, $H2=9\text{ mm}$, $O2=0$) 是当前最好的水平搭配, W , H 和 O 分别代表槽宽、槽深、中心偏移度. 通过直观分析, 也许能找到更好的水平搭配, 其步骤如下:

1) 计算各因素在每个水平下的平均裕度改进量

表 3 第二行分别给出了 $W=2.2\text{ mm}$, $H=6\text{ mm}$ 和 $O=0.33$ 下的 3 次试验得到的失速裕度改进量之和, 例如在 $W=2.2\text{ mm}$ 下, $\sum \overline{M1}=4.92+$

8.25+ 4.22= 17.39(见表 2(1) 中各数据), 其均值 $\sum \overline{M1}=5.80$. 在槽深 6mm 下, $\sum \overline{M2}=4.92+ 3.69+ 3.07= 11.68$, 其均值 $\sum \overline{M2}=3.89$. 在中心偏移度 0.33 下, $\sum \overline{M3}=4.92+ 5.71+ 1.85= 12.48$, 其均值 $\sum \overline{M3}=4.16$. 类似地, 其它行的计算方法同上. 在 3 个槽宽度下失速裕度改进量平均值的极差为 $\text{Max}\{5.80, 4.34, 3.18\}-\text{Min}\{5.80, 4.34, 3.18\}=2.62$. 其它槽深、中心偏移度下的失速裕度改进量平均值的极差计算方法类似.

将 3 个因素的 3 个平均失速裕度改进量点在图 2 上, 有如下结论: ① $W=2.2\text{ mm}$ 时的失速裕度改进量最大; ② $H=12\text{ mm}$ 时的失速裕度改进量最大; ③ $O=0$ 时的失速裕度改进量最大. 综合起来以 $W1H3O2$ ($W1=2.2\text{ mm}$, $H3=12\text{ mm}$, $O2=0$) 组合最好.

2) 将平均失速裕度改进量点图

表 2 10 种机匣的试验结果
Table 2 Experimental results of ten kinds of casing

(1) 换算转速 8 130 r/min					(2) 换算转速 10 765 r/min			
机匣编号	$M_{\text{nps}}/(\text{kg/s})$	π_{ts}^*	η_{M}^*	$\overline{m}/\%$	$M_{\text{nps}}/(\text{kg/s})$	π_{ts}^*	η_{M}^*	$\overline{m}/\%$
Solid	2.934 2	1.071 2	0.926 6	—	3.913 0	1.118 6	0.913 8	—
No. 1	2.797 4	1.071 5	0.930 8	4.92	3.632 2	1.120 8	0.906 4	7.10
No. 2	2.704 2	1.068 7	0.917 6	8.25	3.543 0	1.123 5	0.904 4	10.93
No. 3	2.810 8	1.069 5	0.920 4	4.22	3.818 6	1.122 0	0.899 6	2.78
No. 4	2.825 7	1.069 7	0.926 4	3.69	3.712 3	1.124 2	0.901 2	5.93
No. 5	2.825 8	1.069 0	0.914 9	3.62	3.763 1	1.122 5	0.898 3	4.35
No. 6	2.773 9	1.070 5	0.926 5	5.71	3.744 4	1.123 0	0.897 1	4.91
No. 7	2.846 0	1.070 9	0.921 6	3.07	3.780 5	1.122 8	0.909 9	3.89
No. 8	2.871 9	1.067 9	0.919 6	1.85	3.820 3	1.119 2	0.908 5	2.67
No. 9	2.801 3	1.069 9	0.919 3	4.62	3.883 5	1.121 8	0.910 8	1.05

表 3 各因素在每个水平下的平均失速裕度改进量 (8 130 r/min)
Table 3 Average stall margin improvement of each level of each factor (8 130 r/min)

W/mm	$\sum \overline{M1}/\%$	$\sum \overline{M1}$ 均值	H/mm	$\sum \overline{M2}/\%$	$\sum \overline{M2}$ 均值	O	$\sum \overline{M3}/\%$	$\sum \overline{M3}$ 均值
2.2	17.39	5.80	6	11.68	3.89	0.33	12.48	4.16
3	13.02	4.34	9	13.72	4.573	0	16.56	5.52
3.75	9.54	3.18	12	14.55	4.85	- 0.33	10.91	3.63
极差		2.62			0.96			1.88

将 3 个因素的 3 个平均失速裕度改进量点在图 2 上, 有如下结论: ① $W=2.2\text{ mm}$ 时的失速裕度改进量最大; ② $H=12\text{ mm}$ 时的失速裕度改进量最大; ③ $O=0$ 时的失速裕度改进量最大. 综合起来以 $W1H3O2$ ($W1=2.2\text{ mm}$, $H3=12\text{ mm}$, $O2=0$) 组合最好.

3) 将因素对响应的影响排序

在一项试验中, 诸因素对响应的影响是有主

次的, 对机匣处理试验, 直观上很容易得出, 一个因素对裕度改进量影响大, 是主要的, 那么这个因素不同的水平相应的裕度改进量之间差异就大; 一个因素影响不大, 是次要的, 相应的的裕度改进量之间差异就小. 反应在图 2 上, 点子散布范围大的因素是主要的, 散布范围小的是次要. 从图容易

看出主次关系如下: 主 $\rightarrow$ 次
 $W\ O\ H$

其实, 这个主次关系可用极差来表示, 由表 3 的最后一行, W , H 和 O 三个因素的极差分布为 2. 6, 0. 96 和 1. 88. 由此即可将它们对失速裕度改进量的影响排序为 W, O, H .

4) 追加试验

通过上述正交试验结果的分析, 推测最佳水平组合为 $W1H3O2$. 可惜, 在 9 次试验中没有包含这个水平组合, 故追加 $W1H3O2$ 组合试验, 机匣编号为 No. 10, 该型号机匣的槽深为 12mm, 其它几何参数与与 No. 2 处理机匣的一致. 最简单的方法是在 $W1H3O2$ 下作几次试验, 看看平均失速裕度改进量是否高于已作试验的 9 次试验.

8130 r/min 转速下 No. 10 ($W1H3O2$ 组合) 处理机匣的失速裕度改进量为 8. 81%, No. 2 ($W1H2O2$ 组合) 处理机匣的为 8. 25%, 其扩稳效果比 No. 2 处理机匣的好.

4.2 10765 r/min 转速下实验结果的正交分析

9 次实验结果中以第 2 次的裕度改进量最高, 为 10. 93%, 相应的水平组合 $W1H2O2$ ($W1=2.2\text{ mm}$, $H2=9\text{ mm}$, $O2=0$) 是当前最好的水平搭配. 通过直观分析, 也许能找到更好的水平搭配, 其步骤如下:

- 1) 各因素在每个水平下的平均裕度改进量
- 2) 将平均失速裕度改进量点图

将 3 个因素的 3 个平均失速裕度改进量点在图 3 上, 可得如下结论: ① $W=2.2\text{ mm}$ 时的裕度改进量最大; ② $H=9\text{ mm}$ 时的裕度改进量最大;

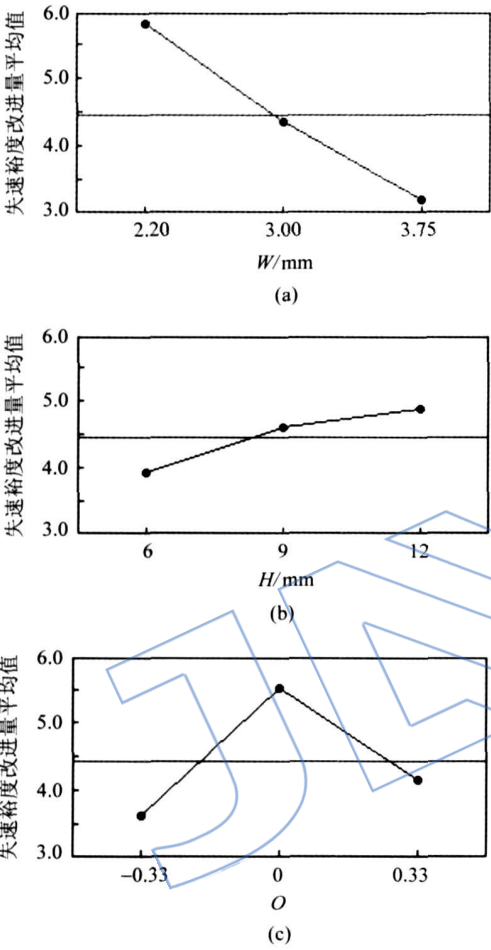


图 2 失速裕度改进量与三因素关系图(8130r/min)
Fig.2 Main effects plot for stall margin improvement
(8130 r/min)

表 4 各因素在每个水平下的平均失速裕度改进量(10765 r/m)

Table 4 Average stall margin improvement of each level of each factor (10765 r/m)

W/mm	$\sum \overline{M1}/\%$	$\sum \overline{M1}$ 均值	H/mm	$\sum \overline{M2}/\%$	$\sum \overline{M2}$ 均值	O	$\sum \overline{M3}/\%$	$\sum \overline{M3}$ 均值
2.2	20.81	6.93	6	16.92	5.64	0.33	14.68	4.89
3	15.19	5.06	9	17.95	5.98	0	17.91	5.97
3.75	7.61	2.54	12	8.74	2.91	-0.33	11.02	3.67
极差		5.23			3.07			2.3

注: 表 4 中平均失速裕度改进量、极差的计算方法与表 3 中的一致.

③ $O = 0$ 时的裕度改进量最大. 综合起来以 $W1H2O2$ 组合最好.

3) 将因素对响应的影响排序

从图3 容易看出主次关系如下: $\begin{matrix} \text{主} \rightarrow \text{次} \\ W & H & O \end{matrix}$

由表4 的最后一行, W , H 和 O 三个因素的极差分布为 5.23, 3.07 和 2.3. 由此即可将它们对失速裕度改进量的影响排序为 W, H, O .

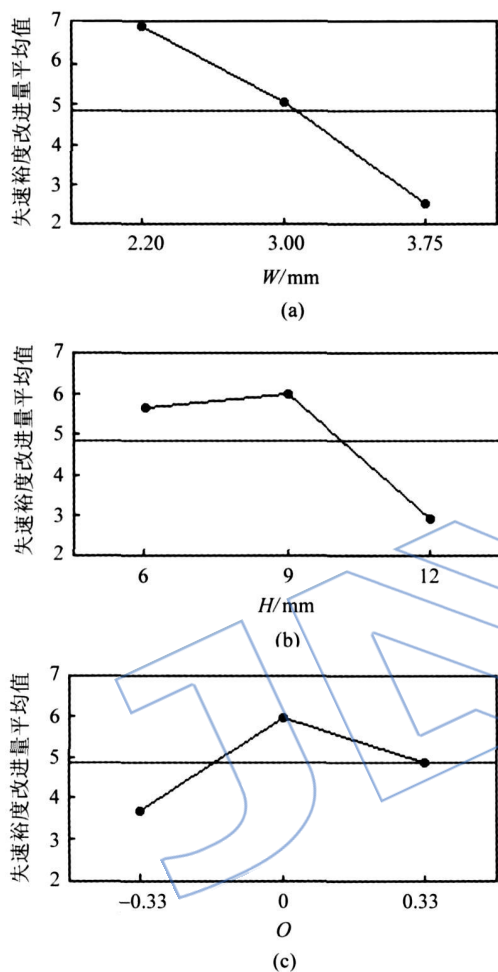


图3 失速裕度改进量与三因素关系图(10765r/min)

Fig.3 Main effects plot for stall margin improvement (10765 r/min)

4) 追加试验

基于正交试验结果的分析, 推断最佳水平组合为 $W1H2O2$, 在 9 次试验中包含这个水平组合. 10765 r/min 转速下 No. 10($W1H3O2$ 组合) 处理机匣的失速裕度改进量为 9.63%, No. 2($W1H2O2$ 组合) 处理机匣的为 10.93%, 其扩稳效果没 No. 2 处理机匣的好.

5 结论

分析周向槽机匣处理的正交实验结果, 可得

到如下结论:

1) 根据正交分析方法在 8130 r/min 转速下得到的推测结果与实验结果相符合. 即推测最佳组合为 $W1H3O2$ (No. 10 处理机匣), 在 9 次实验中没出现, 故追加 $W1H3O2$ 组合试验, 实验结果表明此组合的扩稳效果最好.

2) 使用正交分析方法在 10765 r/min 转速下推测出的结果同样是准确的. 基于实验结果的分析, 推断最佳水平组合为 $W1H2O2$ (No. 2 处理机匣), 在 9 次试验中包含了这个水平组合, 其组合处理机匣在 10765 r/min 转速下获得最大的失速裕度改进量.

3) 在 8130 r/min 和 10765 r/min 两个换算转速下, 周向槽的槽宽因素对失速裕度改进量影响最大. 在 8130 r/min 转速下, 周向槽的槽深因素对失速裕度改进量影响最小; 在 10765 r/min 转速下, 周向槽的中心偏移度因素对失速裕度改进量影响最小.

4) 在各因素无交叉影响的假使前提下, 对试验结果进行正交分析, 在两换算转速下均得到最佳的处理机匣结构并得到了试验的验证, 这表明在正交试验中假使各因素交叉影响可忽略是合理的.

参考文献:

- [1] Osborn W M, Lewis G W Jr. Effect of several porous casing treatments on stall limit and on overall performance of axial flow compressor rotor [R]. NASA, TN D 6537, 1971.
 - [2] Fujita H, Takata H. A study on configurations of casing treatment for axial flow compressor [J]. Bulletin of JSME, 1984, 27(230): 1675-1681.
 - [3] Bailey E E. Effect of grooved casing treatment on the flow range capability of a single stage axial flow compressor [R]. NASA TM X-2459, 1972.
 - [4] Nezam V Y. Development of new casing treatment configuration[J]. JSME International Journal, Series B, 2004, 47(4): 804-811.
 - [5] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
 - [6] 刘志伟, 张长生. 关于周向槽机匣处理的若干观测[J]. 西北工业大学学报, 1985, 3(1): 207-216.
- LIU Zhiwei, ZHANG Changsheng. Some observations of circumferential grooves casing treatment[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1985, 3(1): 207-216. (in Chinese)