

涡轮叶片冷却效果影响因素交互效应分析与 试验研究*

吕 颂, 吴法勇, 王洪斌, 葛宏志

(中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 为研究涡轮叶片冷却效果试验中常见因素变量(质量流量比、温度比及燃气雷诺数)间的交互作用对冷却效果响应变量的影响,采用正交试验设计方案结合试验数据响应面分析方法,对各因素变量的主效应及交互效应进行了分析。结果表明:各因素的主效应对冷却效果的影响程度最大,质量流量比与温度比的交互效应影响程度其次,温度比与燃气雷诺数及质量流量比与燃气雷诺数呈现出较弱的交互效应。拟合回归了带有交互作用项的冷却效果线性化经验公式,给出了因素变量空间内冷却效果响应变量的最大值(约为0.397),95%置信区间为[0.351, 0.449],此时因素变量组合为温度比1.59,质量流量比0.039,燃气雷诺数348000。对拟合回归结果进行了检验,两个状态点的检验回归精度均不大于3%。

关键词: 交互效应; 正交试验设计; 响应面分析; 冷却效果试验; 涡轮叶片

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 05-200352-12

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200352

Analysis and Experimental Research on Interaction Effect of Influencing Factors of Turbine Blade Cooling Effectiveness

LYU Song, WU Fa-yong, WANG Hong-bin, GE Hong-zhi

(AECC Shenyang Engine Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to study the effects of the interaction between the common factor variables (mass flow ratio, temperature ratio and gas Reynolds number) in the cooling effectiveness test of turbine blade on the response variable, an orthogonal test design scheme combined with response surface analysis methodology was carried out with the main effects and interaction effects analyzed. The results show that the main effects of each factor have the greatest influence on the cooling effectiveness, and the interaction effect between the mass flow ratio and the temperature ratio is the second. The temperature ratio with the gas Reynolds number and the mass flow ratio with the gas Reynolds number show weaker interaction effects. At the same time, the regression equation of the cooling effectiveness linearization with interaction terms is fitted, and the maximum value of the cooling effectiveness response variable in the factor variable space is given (about 0.397). 95% confidence interval is [0.351, 0.449]. At this time, the temperature ratio is 1.59, with the mass flow ratio 0.039, the Reynolds number 348000. Finally, the fitting regression results are tested, and the test regression accuracy of two status points is less than 3%.

Key words: Interaction effect; Orthogonal test design; Response surface analysis methodology; Cooling effectiveness test; Turbine blade

* 收稿日期: 2020-05-22; 修订日期: 2020-06-23。

通讯作者: 吕 颂, 硕士, 工程师, 研究领域为涡轮叶片冷却效果试验设计。

引用格式: 吕 颂, 吴法勇, 王洪斌, 等. 涡轮叶片冷却效果影响因素交互效应分析与试验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(5):200352. (LYU Song, WU Fa-yong, WANG Hong-bin, et al. Analysis and Experimental Research on Interaction Effect of Influencing Factors of Turbine Blade Cooling Effectiveness [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5):200352.)

1 引言

对于航空发动机及燃气轮机等大型能源动力输出核心装备来说,涡轮系统组件是最重要的热端部件之一,其设计的发展水平常常成为整台动力设备设计水平的短板,因此一直是国内外相关学者与科研人员争相研究的热点与难点^[1]。近些年来,对于涡轮叶片冷却效果试验方面的研究呈现井喷式的发展,大量的科技文献报道并阐述了多个重要试验因素变量对冷却效果这一响应变量的影响。宋坤等^[2]研究了多斜孔气膜的孔径、开孔率与流向倾角对涡轮叶片综合冷却效果的影响。姚春意等^[3]研究了质量流量比和雷诺数对涡轮叶片气膜冷却效率和换热特性的影响。李润东等^[4]研究了气膜孔形式及四种吹风比下的气膜冷却效率。钟博等^[5]研究了流量比、温比和落压比对叶片综合冷却效率的影响。Huang等^[6]研究了不完美的气膜孔的阻塞方位及阻断比等对气膜冷却效果的影响,Yu等^[7]使用PSP压敏漆研究了吹风比、密度比和气膜孔位置对气膜冷却效果的影响。据不完全统计,在这些文献中关于冷气与燃气质量流量比对冷却效果影响的研究占27.7%,关于冷气与燃气吹风比的研究占25.5%,关于燃气与冷气温度比的研究占14.9%,关于燃气雷诺数的研究占14.9%,关于燃气湍流度的研究占10.6%,关于其他因素变量的研究占6.4%。付仲议等^[8-10]在多篇文献中研究了燃气雷诺数、质量流量比、主流湍流度及冷气密度比等对涡轮叶片气膜冷却效果的影响。姚韵嘉等^[11]研究了叶栅上游间隙冷气质量流量比与间隙位置对端壁气膜冷却性能的影响。姚春意等^[12]及王培泉等^[13]分别研究了主流湍流度、吹风比、流量比、温度比和主流雷诺数对涡轮叶片综合冷却效果的影响。其他的高校老师也有类似的研究^[14-17],大多集中于吹风比、开孔率、尾迹斯特劳哈尔数、多排孔的排列方式及孔间距等因素变量对冷却效果的影响。在这里值得一提的是,目前国内外大部分关于对涡轮叶片冷却效果的研究均是基于单因素法(OFAT, one factor at a time)的因素变量主效应研究,而对于两两因素间的交互效应却鲜有记载与报道,同时大部分的研究也都是针对叶片外换热的气膜冷却形式而言。随着涡轮叶片冷却设计技术的不断发展,带有内部扰流的冲击、层板、双层壁等一系列复合冷却技术逐渐应用并趋于成熟,试验因素变量间的交互效应不应该再被忽略,反而应成为今后研究的重点。

交互效应又叫交互作用,如果因素A的效应依赖

于因素B所处的水平时,则称因素A与B之间存在交互效应。关于该方面的研究在其他工程应用领域都有所开展,研究的深浅程度各不相同。在密封力学方面,陈源等^[18]研究了转轴轴向振动力学系统各影响因素间的两两交互效应(螺旋角、弹簧刚度、密封圈阻尼和挠性环质量)对密封性能的影响。李强等^[19]研究了每齿进给量与切削液流速、空气压强与水油流量之间的交互效应对单晶高温合金铣削表面粗糙度的影响。Neriya等^[20]利用设计的微型风洞研究了低雷诺数下悬臂梁的流体微观结构之间交互效应,即长度、宽度和厚度对尖端变形的影响。Wang等^[21]研究了层流燃烧速度、测量灵敏度、静置距离与火焰厚度这四个因素变量之间的交互效应对绝热火焰燃烧温度的影响。

本文应用正交试验设计法^[22-24],创建了三因素三水平,即 $L_9(3^3)$ 的正交试验设计方案,研究了工程上最常见的三个因素变量(质量流量比、温度比及燃气雷诺数)的主效应及两两交互效应对涡轮叶片综合冷却效果的影响。对各主效应与交互效应影响的重要程度进行了排序,同时应用响应面分析法拟合回归了带有交互效应的冷却效果经验公式,通过最优解设计得到了指定边界条件内的冷却效果最大值及其因素变量组合,并用真实状态数据点对经验公式进行了检验。

2 正交试验设计与响应面分析

2.1 正交试验设计

常规的涡轮叶片冷却效果试验所用到的设计方法通常称为单因素简单比较法(OFAT),其原理为确定好设计点后给出因素变量的水平范围及水平个数,每次保证其他因素变量水平不变的前提下改变单一因素变量的水平,由此来判断该因素变量对冷却效果响应的影响情况。以三因素三水平为例,该方法试验数据点如表1所示(其中-1代表低水平,0

Table 1 List of single factor method data

Level	Factor A	Factor B	Factor C
1	0	0	0
2	-1	0	0
3	1	0	0
4	0	-1	0
5	0	1	0
6	0	0	-1
7	0	0	1

代表中水平,1代表高水平),其空间分布如图1所示。从图中可以看出,单因素法的数据点在空间分布中表现为三条两两垂直相交的直线段,通过该方法拟合回归出的经验公式对直线段上的点预判较好,而并不能代表空间内其他点的数据特征。同时应用单因素法进行试验的条件下后期无法进行因素变量间的交互效应分析,因此具有相当大的局限性。

正交试验设计法(OED, orthogonal experimental design)是由日本试验学家、统计学家田口玄一博士提出的一种效率较高的部分析因试验方法,其原理为根据因素变量数与水平数设计相应的正交表,保

证数据点“均匀分散,整齐可比”,能够尽量代表空间内大部分数据点的特征。因为同种类型正交表并不唯一,因此同样以三因素三水平为例,设计了两种正交数据表 $L_9(3^3)$ 如表2所示,各自空间分布如图2,图3所示。从图中可以看出正交表1中数据点分布于空间中两个平行平面上,并不符合均匀分散、整齐可比的正交表特征。而正交表2中数据点的空间分布形式较好,任意三个以上的数据点均不共面,且9个数据点分层分布,每层中数据点的特征位置均不重复,完全符合正交表均匀分散、整齐可比的特征,因此应用正交表2对冷却效果试验进行设计。

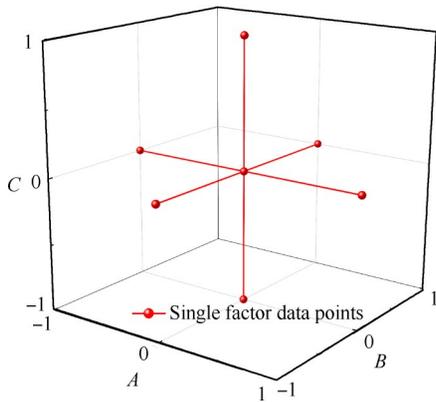


Fig. 1 Spatial distribution of data points with single factor method

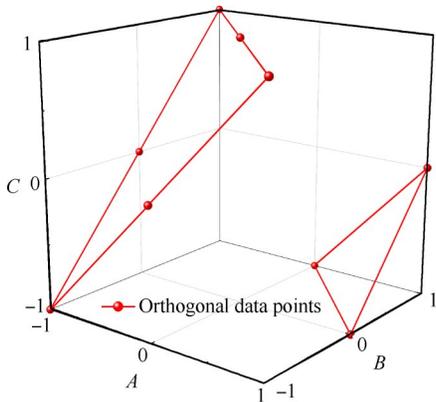
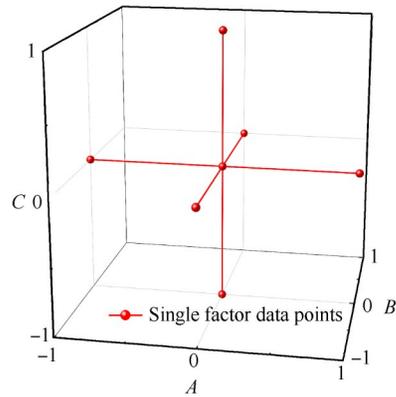


Fig. 2 Spatial distribution of data points in orthogonal table 1

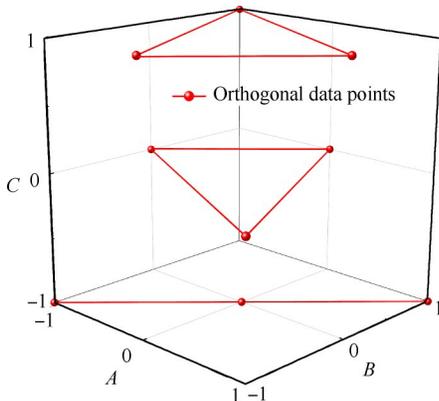
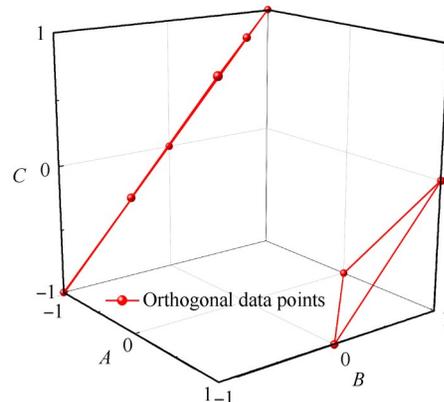


Fig. 3 Spatial distribution of data points in orthogonal table 2

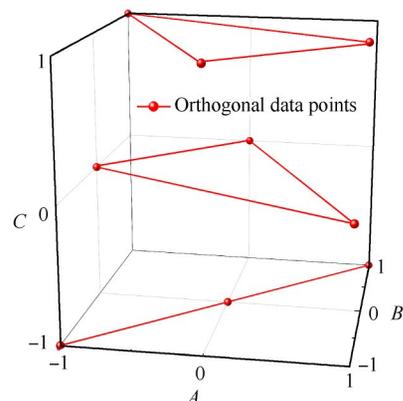


Table 2 List of two orthogonal data points

Level	Orthogonal table 1			Orthogonal table 2		
	Factor A	Factor B	Factor C	Factor A	Factor B	Factor C
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	0	0	-1	0	0
3	-1	1	1	-1	1	1
4	0	-1	0	0	-1	1
5	0	0	1	0	0	-1
6	0	1	-1	0	1	0
7	1	-1	1	1	-1	0
8	1	0	-1	1	0	1
9	1	1	0	1	1	-1

正交表 2 中各因素间两两交互效应及混杂情况如表 3 所示,从表中可以看出由于是基于三水平设计,主效应与交互效应间并未出现混杂情况,因此该正交表可用。

Table 3 Pairwise interaction effects and mixing in the orthogonal table 2

Level	Factor A	Factor B	Factor C	A×B	A×C	B×C
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	0	0	0	0	0
3	-1	1	1	-1	-1	1
4	0	-1	1	0	1	-1
5	0	0	-1	0	0	0
6	0	1	0	1	0	1
7	1	-1	0	-1	1	0
8	1	0	1	1	1	1
9	1	1	-1	1	-1	-1

2.2 响应面分析

响应面分析法(RSAM, Response surface analysis methodology)是目前较为流行的处理多个输入因素对响应产生的量化影响的方法,其原理为对于多个输入变量采用和泰勒展开类似的策略,如式(1)所示。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

式中 y 为试验输出响应变量, β 为系数, x 为输入因素变量, ε 为观测误差。由于式(1)中仅研究一次项主效应,工程应用上较为粗略,增加二次项交互效应后一般情况下可以得到较为满意的答案,如式(2)所示。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i + \sum_{j=1}^m \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i \geq j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

为简单起见,将两个变量的乘积合并,用一个变量来代替,即用 x_{ii} 代替 x_i , x_{ij} 代替 $x_i x_j$, 得到公式(3)。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

即 $Y = X\beta + \varepsilon$, 其中 $Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}$

$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$, 最小方差为式(4)。

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ij}^2 = \varepsilon' \varepsilon = (Y - X\beta)'(Y - X\beta) \quad (4)$$

当方差最小时,拟合回归的曲面和实际值最接近, $\frac{\partial L}{\partial \beta} \Big|_{\hat{\beta}} = -2X'Y + 2X'X\hat{\beta} = 0$, 可得 $\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y$,

获得的响应曲面为 $\hat{Y} = \hat{X}\hat{\beta}$ 。这种通过有限次试验与响应分析来确定近似模型的方法称为相应曲面分析法,最早由数学家 Box 和 Wilson 提出,用于指导相关设计及试验。

3 涡轮叶片冷却效果试验

3.1 试验原理

涡轮叶片冷却效果 θ , 又叫冷却效率,一般情况下该参数可以写成式(5)。

$$\theta = \frac{T_g^* - T_w}{T_g^* - T_c} = f(Re_g, K_T, K_C) \quad (5)$$

式中 T_g^*, T_w, T_c 分别为燃气栅前总温、涡轮叶片平均壁温、冷气进口总温, Re_g, K_T, K_C 分别为燃气栅后雷诺数、燃气对冷气的总温比、冷气对燃气的流量比。其中燃气栅后雷诺数的计算方法如式(6)~式(8),温度比的计算方法如式(9),质量流量比的计算方法如式(10)。

$$Re_g = \frac{\rho_g \nu_g d}{\mu_g} = \frac{G_g d}{\mu_g A} \quad (6)$$

式中 ρ_g 为燃气栅后密度, ν_g 为燃气栅后流速, d 是特征长度,为固定值,一般取叶片中截面弦长, μ_g 为燃气栅后动力黏度系数,为燃气栅后静温 T_g 的单值函数。 G_g 为燃气质量流量,可以直接测量, A 为燃气叶栅通道截面积,为固定值。

$$T_g = \frac{T_g^*}{1 + 0.165 \times Ma_g^2} \quad (7)$$

式中, T_g^* 为燃气栅前总温,可以直接测量。

$$Ma_g = \sqrt{\left(\left(\frac{p_g^*}{p_g} \right)^{0.24812} - 1 \right) \times 6.0606} \quad (8)$$

式中, p_g^* 为燃气栅前总压, p_g 为燃气栅后静压, 均可直接测量。

$$K_T = \frac{T_g^*}{T_c^*} \quad (9)$$

式中 T_c^* 为冷气进口总温, 可以直接测量。

$$K_C = \frac{G_c}{G_g} \quad (10)$$

式中 G_c 为冷气质量流量, 可以直接测量。

3.2 试验测量参数分类

涡轮叶片冷却效果试验中的直接、间接测量参数如表4所示, 共有14个。其中直接测量参数7个, 第一级间接测量参数4个, 第二级间接测量参数2个, 第三级间接测量参数1个。

3.3 试验系统

涡轮叶片冷却效果试验应用专门设计的试验装置进行, 如图4所示。其中燃气流量 G_g 和冷气流量 G_c 采用经过定期周检的流量计测量, 燃气总温 T_g^* 和冷气总温 T_c^* 采用专门设计的总温受感部及探针测量, 燃气静压 p_g 采用密封接头和测压管测量, 燃气总压 p_g^* 采用专门设计的总压受感部测量, 试验件外壁面温度 T_w 采用经过专业校检的触底型铠装热电偶测量, 各测点位置如图5所示。

燃气流量 G_g 和冷气流量 G_c 分别位于主流通道与二次流通道入口处, 燃气总温 T_g^* , 燃气总压 p_g^* 与冷气总温 T_c^* 分别位于主流叶栅通道入口与二次流

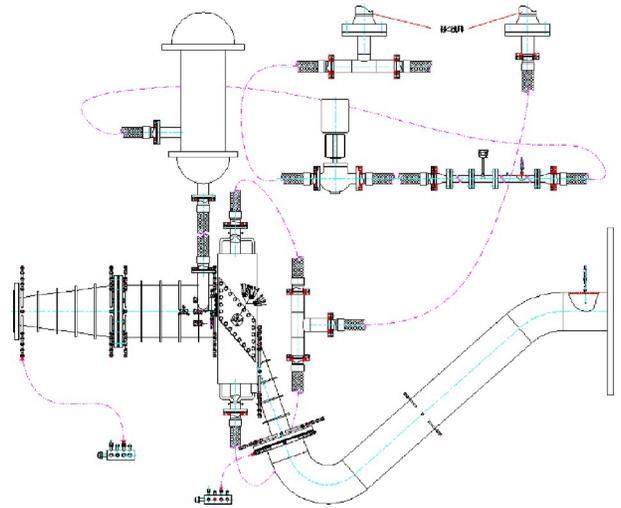


Fig. 4 Test device for cooling effectiveness of turbine blades

冷气流路入口处, 试验件壁面温度 T_w 位于涡轮叶片外换热表面并喷涂涂层, 厚度为0.1mm, 尽量减少导热对试验结果的影响, 燃气静压 p_g 位于主流叶栅通道出口处。

试验数据采集系统由数据采集模块及计算机采集系统组成, 测量原理见图6。试验过程中的流量信号产生的电信号经过采集模块 ADAM4117 传送至计算机, 压力测试信号经过 DSA3217 压力扫描阀传送至计算机, 温度测试信号通过 EX1048 热电偶测量仪传送至计算机。最终由计算机完成数据处理、显示及存储。

3.4 试验实施

应用前文设计的正交表2进行试验设计, 并且加入设计状态点(温度比1.73, 质量流量比0.019, 燃气

Table 4 List of measurement parameters

Parameters	Symbol	Measurement type
Gas mass flow	$G_g / (\text{kg/s})$	Direct measurement parameter
Total gas temperature	T_g^* / K	Direct measurement parameter
Total gas pressure	p_g^* / MPa	Direct measurement parameter
Static gas pressure	p_g / MPa	Direct measurement parameter
Cooling mass flow	$G_c / (\text{kg/s})$	Direct measurement parameter
Total cooling pressure	T_c^* / K	Direct measurement parameter
Wall temperature	T_w / K	Direct measurement parameter
Flow ratio	K_C	The first indirect measurement parameter
Temperature ratio	K_T	The first indirect measurement parameter
Mach number	Ma_g	The first indirect measurement parameter
Cooling effectiveness	θ	The first indirect measurement parameter
Static gas temperature	T_g / K	The second indirect measurement parameter
Viscosity coefficient	$\mu_g / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	The second indirect measurement parameter
Reynolds number	Re_g	The third indirect measurement parameter

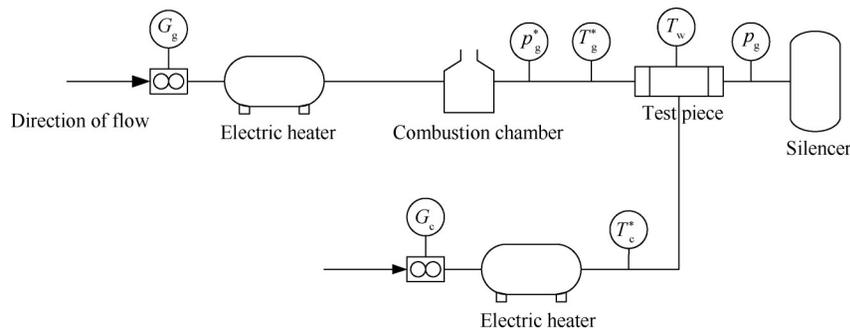


Fig. 5 Schematic diagram of the measuring point location

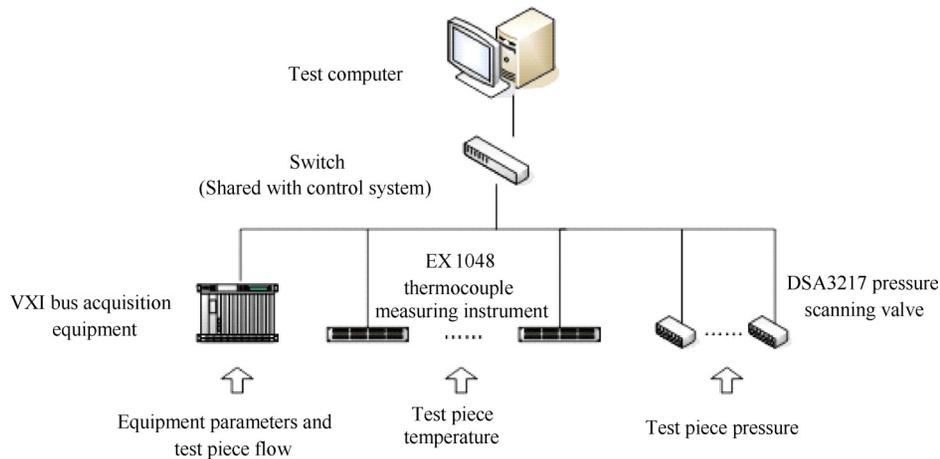


Fig. 6 Schematic diagram of the test data acquisition system

雷诺数 372000)及两个检验点(温度比 1.62,质量流量比 0.027,燃气雷诺数 384000 与温度比 1.67,质量流量比 0.035,燃气雷诺数 417000)用以验证拟合回归模型的正确性,共计 12 个状态数据点,如表 5 所示,数据点的空间分布情况如图 7 所示。与图 3 相同,图 7 中的任意三个以上的正交数据点均不共面,且分层分布,每层中正交数据点的特征位置均不重复,因此其整齐分散性较好,符合设计目标。

Table 5 List of test status data points

Level	K_T	K_C	Re_g
1	1.59	0.015	348000
2	1.59	0.019	372000
3	1.59	0.039	457000
4	1.73	0.015	457000
5	1.73	0.019	348000
6	1.73	0.039	372000
7	1.87	0.015	372000
8	1.87	0.019	457000
9	1.87	0.039	348000
10 (design point)	1.73	0.019	372000
11 (test point 1)	1.62	0.027	384000
12 (test point 2)	1.67	0.035	417000

4 试验数据分析

4.1 试验数据响应面分析

应用响应面分析法对冷却效果因素-响应模型进行分析,工程上在仅考虑因素主效应的前提下,涡轮叶片冷却效果的响应-因素模型函数可以写成公式(11)

$$\theta = f(K_C, K_T, Re_g) = C \cdot K_C^\alpha \cdot K_T^\beta \cdot Re_g^\gamma \quad (11)$$

对上式两边取对数线性化后加入二次项交互效应后,可得公式(12)

$$\begin{aligned} \ln \theta = & \ln C + \alpha \ln K_C + \beta \ln K_T + \gamma \ln Re_g + \\ & \chi \ln K_C \cdot \ln K_T + \delta \ln K_C \cdot \ln Re_g + \\ & \lambda \ln K_T \cdot \ln Re_g \end{aligned} \quad (12)$$

根据上式,对所测得的 10 个正交点及设计点测量值进行线性化后,对其进行初步响应面拟合回归分析,得到帕累托指数如图 8 所示。从图中可以看出,该模型中在显著性水平为 0.05 的前提下,帕累托指数标准数值为 3.18,流量比对数的帕累托指数约为 25.00,温度比对数的帕累托指数约为 4.72,可见本次试验中质量流量比主效应与温度比主效应是影响冷却效果最主要的因素效应,同时也是显著性因素效

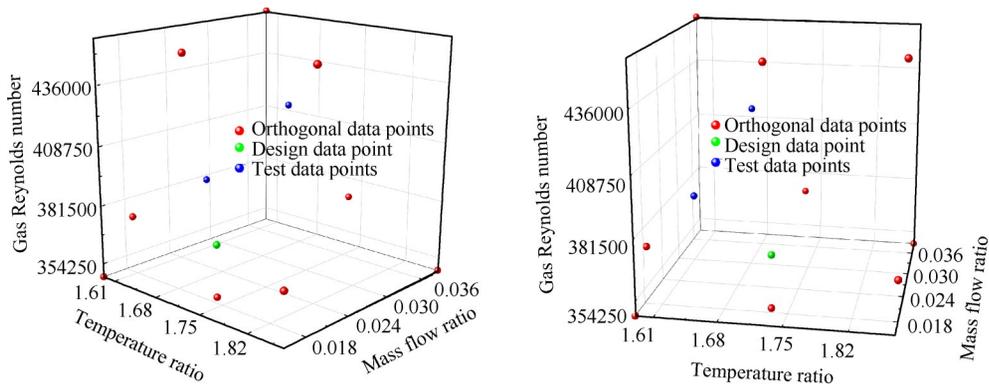


Fig. 7 Spatial distribution of data points

应(>3.18),燃气雷诺数对数及质量流量比对数乘以温度比对数的帕累托指数依次约为 1.53 与 1.28,可见本次试验中燃气雷诺数主效应及质量流量比与温度比的交互效应是影响冷却效果的次要因素效应,影响程度依次降低。温度比对数乘以燃气雷诺数对数及质量流量比对数乘以燃气雷诺数对数的帕累托指数分别为 0.453 和 0.046,可见温度比与燃气雷诺数的交互效应及质量流量比与燃气雷诺数的交互效应是非重要因素效应,对冷却效果的影响程度较小。

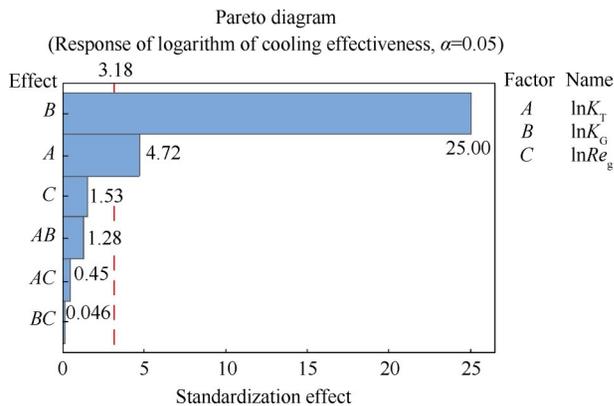


Fig. 8 Pareto index chart of main effect and interaction effect of various factors

拟合回归所得的经验公式如式(13)所示,其中因素变量的适用范围为流量比 $K_c \in [0.015, 0.039]$,温比 $K_T \in [1.59, 1.87]$,雷诺数 $Re_g \in [348000, 457000]$ 。冷却效果对数拟合残差情况如图 9 所示,从图中可以看出最大残差值不超过 0.02,且整体符合正态分布,说明拟合回归程度较好。

$$\ln \theta = 4.9 - 5.97 \ln K_T + 0.62 \ln K_C - 0.294 \ln Re_g - 0.393 \ln K_T \cdot \ln K_C + 0.311 \ln K_T \cdot \ln Re_g - 0.008 \ln K_C \cdot \ln Re_g \quad (13)$$

三个因素变量线性化后对响应变量的主效应如图 10 所示,从图中可以看出,质量流量比对数直线的

斜率最大,反映出其对响应的影响程度最大,并且与响应呈现正向作用关系。温度比对数直线的斜率其次,反映出其对响应的影响程度处于中游,同时与响应呈现负向作用关系。燃气雷诺数对数直线的斜率最小,反映出其对响应的影响程度最小,同样也与响应呈现负向作用关系。

质量流量比与温度比线性化后对响应变量的交互效应如图 11 所示,从图中可以看出,两者间的交互效应较为明显,两者对响应的影响程度均依赖对方所处的水平。当质量流量比对数处于低水平时,温度比对数直线的斜率最小,说明此时温度比对冷却效果的影响程度也最低,整体冷却效果响应的对数均值也最低。当质量流量比对数水平升高时,温度比对数直线的斜率也依次增加,说明温度比对冷却效果的影响程度也逐渐增加,同时整体冷却效果响应的对数均值也逐渐增加。相应的,当温度比对数处于低水平时,质量流量比对数直线的斜率最大,说明此时质量流量比对冷却效果的影响程度也最大,整体冷却效果响应的对数均值也最高。当温度比对数水平升高时,质量流量比对数直线的斜率降低,说明质量流量比对冷却效果的影响程度也逐渐降低,同时整体冷却效果响应的对数均值也逐渐减小。上述这些均反映了二者之间存在较大的交互效应。

温度比与燃气雷诺数线性化后对响应变量的交互效应如图 12 所示,从图中可以看出,两者间也存在交互效应,不过与温度比和质量流量比之间的交互效应相比,其对响应的影响程度较弱。当燃气雷诺数对数处于低水平时,温度比对数直线的斜率最大,说明此时温度比对冷却效果的影响程度最高,整体冷却效果响应的对数均值最大。当燃气雷诺数对数水平升高时,温度比对数直线的斜率也依次降低,说明温度比对冷却效果的影响程度也逐渐降低,同时整体冷却效果响应的对数均值也逐渐减小。相应

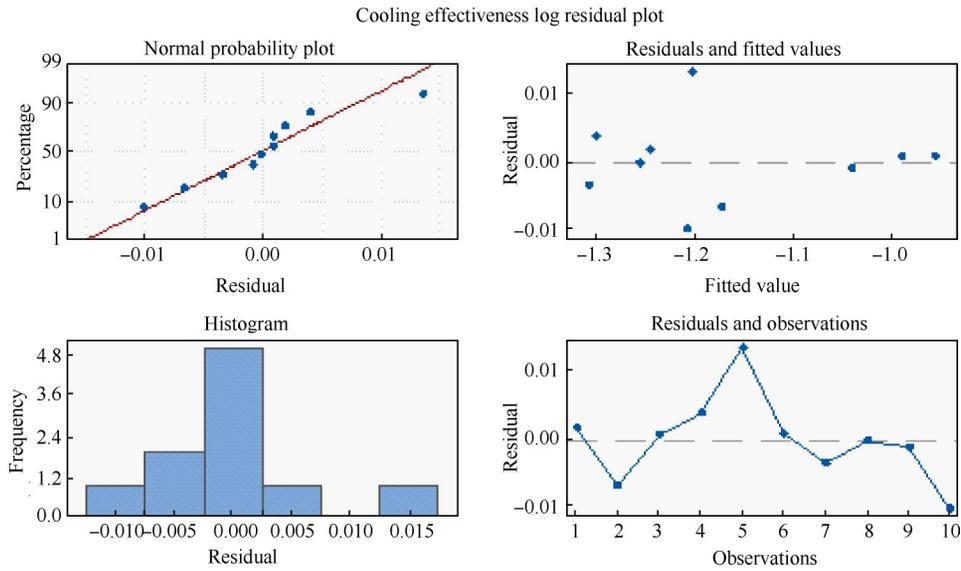


Fig. 9 Cooling effectiveness logarithm fitting residual plot

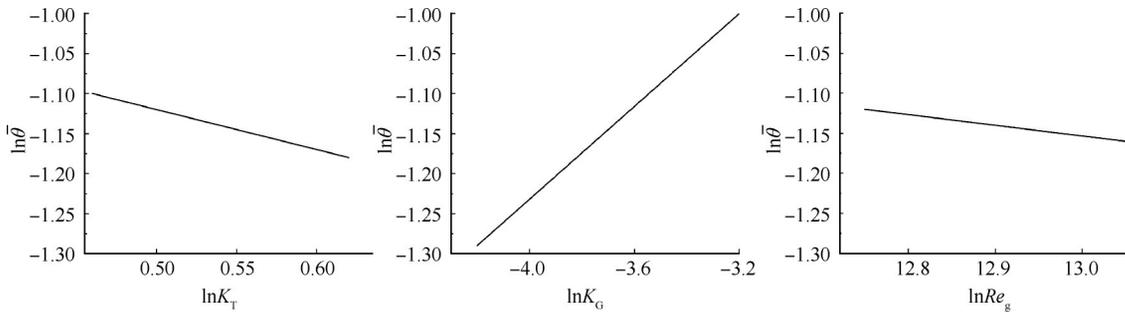


Fig. 10 Three-factor linearization main effect diagram

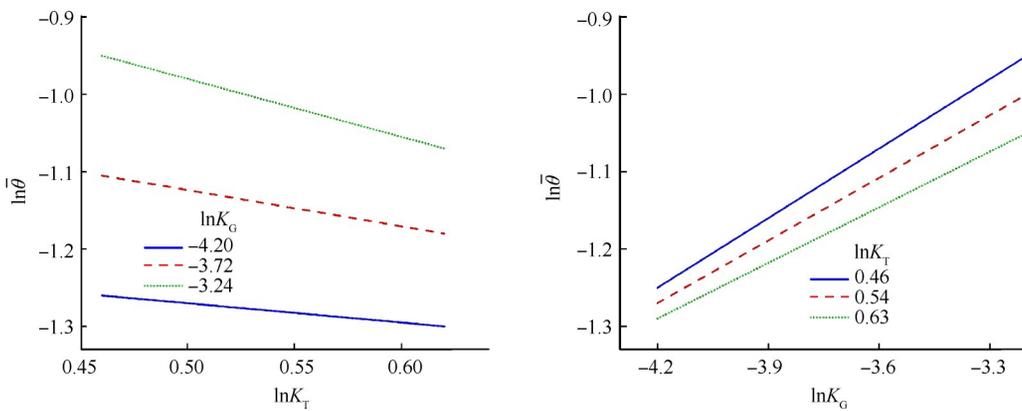


Fig. 11 Linearization interaction diagram of flow ratio and temperature ratio

的,当温度比对数处于低水平时,燃气雷诺数对数直线的斜率最大,说明此时燃气雷诺数对冷却效果的影响程度也最大,整体冷却效果响应的对数均值也最高。当温度比对数水平升高时,燃气雷诺数对数直线的斜率也降低,说明燃气雷诺数对冷却效果的影响程度也逐渐降低,同时整体冷却效果响应的对数均值也逐渐减小。上述这些也反映了二者之间存在一定的交互效应。

质量流量比与燃气雷诺数线性化后对响应变量的交互效应如图 13 所示,从图中可以看出质量流量比与燃气雷诺数之间几乎不存在交互效应。无论燃气雷诺数对数处于任何水平下,质量流量比对数直线的斜率均相同,说明质量流量比对冷却效果的影响程度不随燃气雷诺数水平的变化而变化。相应的,无论质量流量比处于任何水平下,燃气雷诺数对数直线的斜率均相同,说明燃气雷诺数对冷却效果

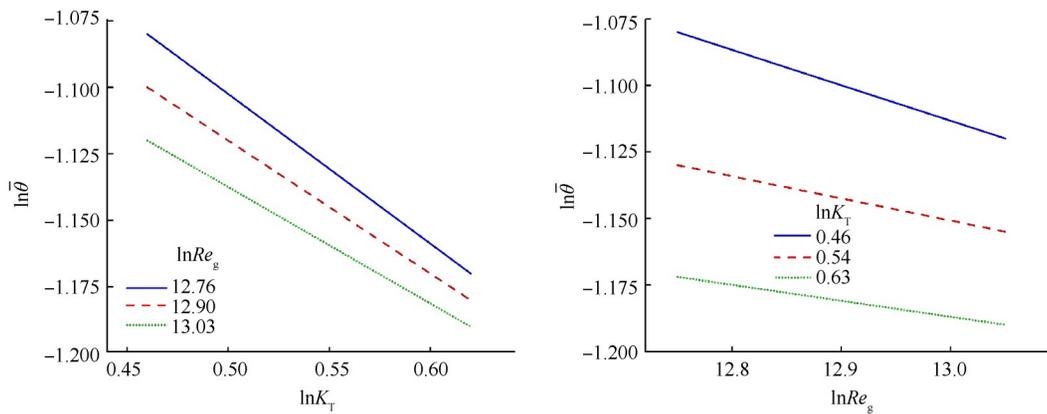


Fig. 12 Linearization interaction diagram of temperature ratio and Reynolds number

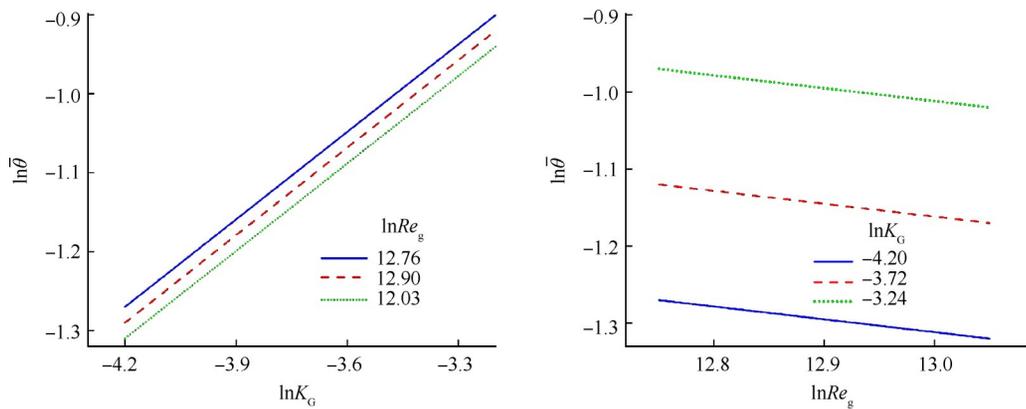


Fig. 13 Linearization interaction diagram of flow ratio and Reynolds number

的影响程度不随质量流量比水平的变化而变化。上述这些反映了二者之间不存在交互效应。

三个因素变量之间的两两交互效应规律也可以从等值线图中得到相同结论,如图 14~图 16 所示。从图组中可以看出,在保证燃气雷诺数对数为固定值的前提下,质量流量比对数与温度比对数等值线图呈现出较明显的曲率现象,说明二者之间存在一定的交互效应,增加质量流量比以及减小温度比会最大效率地提升冷却效果。

在保证质量流量比对数为固定值的前提下,温度比对数与燃气雷诺数对数等值线图也呈现出一定的曲率现象,不过曲率与前者相比较小,说明二者之间也存在一定的交互效应,不过强度较弱,降低燃气雷诺数以及减小温度比会最大效率地提升冷却效果。

在保证温度比对数为固定值的前提下,质量流量比对数与燃气雷诺数对数等值线图均为平行直线,没有出现曲率现象,说明二者之间不存在交互效应。增加温度比以及降低燃气雷诺数会最大效率地提升冷却效果。

从分析结果来看,在对综合冷却效果这一响应

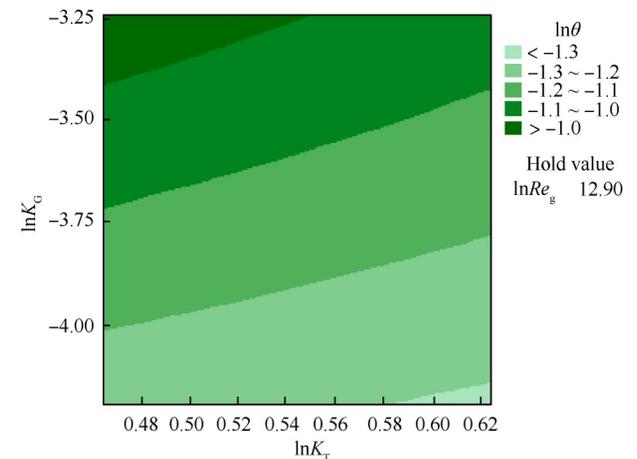


Fig. 14 Contour of linearized interaction effect of flow ratio and temperature ratio

变量具有一定影响的各因素效应中,主效应仍然是具有绝对影响力的因素效应。不过随着内外冷却结构越来越复杂,因素变量之间的交互效应越明显,在某些条件下已无法被忽视。如本文中研究的涡轮叶片质量流量比与温度比之间的交互效应对冷却效果的影响程度已与燃气雷诺数主效应对冷却效果的影响程度相差无几。

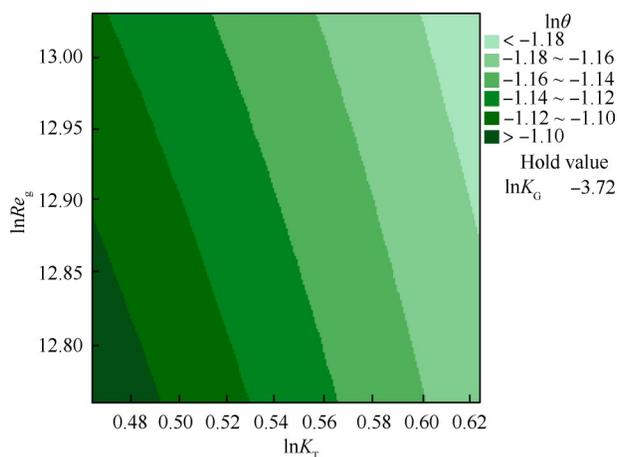


Fig. 15 Contour of linearization interaction effect of temperature ratio and Reynolds number

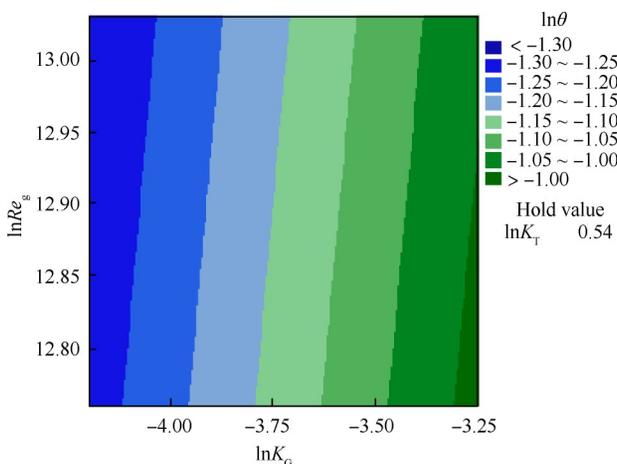


Fig. 16 Contour of linearization interaction effect of flow ratio and Reynolds number

在众多因素效应中,与冷气射流相关的主效应为最主要的因素效应,因为当质量流量比或温度比发生变化时,一方面冷气与叶片内表面之间的对流换热增强,热阻减小,另一方面冷气流出后对叶片外表面实行气膜覆盖的对流换热也增强,并且相比来说质量流量比的上述工作效率要高于温度比。因此

质量流量比主效应是最主要的因素效应,温度比主效应次之。当燃气雷诺数升高时,燃气主流和叶片之间的热交换增大,即热流量变大。不过在研究主效应时为保证质量流量比不变,冷气的流量同时也增大,从而带走了更多的热量,导致冷却效果变化不大。因此燃气雷诺数主效应是次要因素效应。当质量流量比处于低水平时,冷气流量较小,气膜孔冷气流出后对燃气主流边界层产生的扰动影响不大,此时改变冷气温度对冷却效果的影响不大,即温度比对冷却效果的影响程度较低。当温度比处于低水平时,冷气温度较高,冷气对壁面对流换热冷却性能较差,此时改变冷气流量能显著提升冷却效果,即质量流量比对冷却效果的影响程度较大。因此质量流量比与温度比之间的交互效应也是次要因素效应,对冷却效果具有一定的影响。根据同样的方法可以得到温度比与燃气雷诺数的交互效应及质量流量比与燃气雷诺数的交互效应是非重要因素效应的结论。

4.2 最优解设计

根据拟合回归得到的经验公式(13),对冷却效果对数响应变量进行望大优化特性分析,即最优解设计,因素变量取值范围为正交试验中各因素水平的上下限,如表6所示。

响应变量的拟合值及相关区间值如表7所示,冷却效果预测拟合最大值为0.397,95%置信区间为[0.351,0.449],由于计算模型的交互效应项过多导致置信区间较大。此时因素变量取值分别为:温度比1.59,质量流量比0.039,燃气雷诺数348000。

4.3 拟合回归结果检验

在响应-因素空间模型范围内选取两个检验点(表8中水平11及水平12)对经验公式(13)进行检验,得到检验结果见表8。从表中可以得出,响应变量实测值的变化趋势与经验公式回归计算结果一致,检验回归精度分别为2.67%与2.50%,可见经验

Table 6 Range of factor variables

	Temperature ratio logarithm	Temperature ratio	Flow ratio logarithm	Flow ratio	Reynolds number logarithm	Reynolds number
Parameter value	[0.464,0.625]	[1.59,1.87]	[-4.19,-3.25]	[0.015,0.039]	[12.76,13.03]	[348000,457000]

Table 7 Fitted values and confidence intervals of response

	Fitted value	Standard error of fitted value	95% confidence interval	95% forecast interval
Logarithm of cooling effectiveness	-0.9232	0.0384	[-1.0456,-0.8009]	[-1.0505,-0.7959]
Cooling effectiveness	0.397	0.0384	[0.351,0.449]	[0.350,0.451]

Table 8 Test results of two state data points

Level	Cooling effectiveness measurement	Cooling effectiveness fitting regression calculation value	Test regression accuracy/%
11	0.353	0.3627	2.67
12	0.374	0.3836	2.50

公式的拟合回归结果令人满意。

5 结 论

本文对涡轮叶片冷却效果试验进行了正交设计与试验数据响应面分析,着重研究了因素变量间的交互效应,得到结论如下:

(1)正交试验设计与单因素法相比,能够代表因素变量空间内更多数据点的特征,是一种“性价比”较高的部分析因试验设计方法,应用该方法后期可以进行因素变量间的交互效应分析。

(2)应用试验数据响应面分析方法可以分析因素变量间的交互效应,判断一个因素在另一因素不同水平下对响应变量的影响。

(3)各因素效应对涡轮叶片冷却效果影响程度从大到小排序依次为:质量流量比主效应、温度比主效应、燃气雷诺数主效应、温度比与质量流量比交互效应、温度比与燃气雷诺数交互效应及质量流量比与燃气雷诺数交互效应。值得一提的是,该因素效应影响程度排序仅适用于本文所研究叶片的内外冷却结构形式,对于其他冷却结构形式的排序及因素变量间交互效应的大小还需大量试验支持。

(4)带有交互效应的涡轮叶片冷却效果线性化拟合回归经验公式为 $\ln \theta = 4.9 - 5.97 \ln K_T + 0.62 \ln K_C - 0.294 \ln Re_g - 0.393 \ln K_T \cdot \ln K_C + 0.311 \ln K_T \cdot \ln Re_g - 0.008 \ln K_C \cdot \ln Re_g$, 因素变量空间内冷却效果拟合最大值为0.397,95%置信区间为[0.351,0.449],最高冷却效果的因素组合为:温度比1.59,质量流量比0.039,燃气雷诺数348000,拟合经验公式通过检验得到回归精度不大于3%。

参考文献

- [1] Holgate N E, Ireland P T, Romero E. An Experimental-Numerical Method for Transient Infrared Measurement of Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Coefficient in a Single Test [J]. *The Aeronautical Journal*, 2019, 123(1270): 1982-1998.
- [2] 宋 坤, 张净玉, 王嘉玺, 等. 等压差条件下多斜孔综合冷效实验研究 [J]. *推进技术*, 2019, 40(8): 1842-1849. (SONG Kun, ZHANG Jing-yu, WANG Jia-xi, et al. Experimental Study on Overall Cooling Ef-
- fectiveness of Inclined Multihole under the Same Pressure Differential [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(8): 1842-1849.)
- [3] 姚春意, 朱惠人, 刘存良, 等. 高湍流度时全气膜涡轮叶片表面冷却和换热特性的实验研究 [J]. *推进技术*, 2020, 41(6): 1361-1370. (YAO Chun-yi, ZHU Hui-ren, LIU Cun-liang, et al. Experimental Study on Film Cooling and Heat Transfer Characteristics of a Fully-Cooled Turbine Vane at High Turbulence Intensity Condition [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(6): 1361-1370.)
- [4] 李润东, 李明春, 贺业光, 等. 射流角度对姊妹孔气膜冷却效果影响实验研究 [J]. *推进技术*, 2020, 41(8). (LI Run-dong, LI Ming-chun, HE Ye-guang, et al. Experimental Study on Effects of Injection Angles on Film Cooling Performance of Sister Holes [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(8).)
- [5] 钟 博, 郭昊雁, 魏景涛, 等. 涡轮叶片综合冷却效率实验研究 [J]. *推进技术*, 2021, 42(2). (ZHONG Bo, GUO Hao-yan, WEI Jing-tao, et al. Experimental Investigation on Integrated Cooling Efficiency of Turbine Blade [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(2).)
- [6] Huang K, Zhang J, Tan X, et al. Experimental Study on Film Cooling Performance of Imperfect Holes [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, 31(6): 1215-1221.
- [7] Yu Z Q, Li C, An B, et al. Experimental Investigation of Film Cooling Effectiveness on a Gas Turbine Blade Pressure Surface with Diffusion Slot Holes [J]. *Applied Thermal Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019>.
- [8] 付仲议, 朱惠人, 姚春意, 等. 亚声速涡轮导叶全气膜冷却特性实验研究 [J]. *推进技术*, 2019, 40(1): 158-165. (FU Zhong-yi, ZHU Hui-ren, YAO Chun-yi, et al. Experimental Investigation of Full Film Cooling Characteristics of Subsonic Turbine Guide Vane [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(1): 158-165.)
- [9] 付仲议, 朱惠人, 姜 茹, 等. 高主流湍流度下密度比对涡轮导叶全气膜冷却特性的影响 [J]. *推进技术*, 2019, 40(7): 1585-1593. (FU Zhong-yi, ZHU Hui-ren, JIANG Ru, et al. Effects of Density Ratio on Full Film Cooling Characteristics of Turbine Guide Vane with High Mainstream Turbulence [J]. *Journal of Propulsion*

- Technology*, 2019, 40(7): 1585-1593.)
- [10] Zhongyi F, Huiren Z, Lijian C, et al. Experimental Investigation on the Effect of Mainstream Turbulence on Full Coverage Film Cooling Effectiveness for a Turbine Guide Vane [J]. *Journal of Thermal Science*, 2019, 1(28): 145-157.
- [11] 姚韵嘉, 祝培源, 陈云, 等. 间隙位置对叶片端壁气膜冷却性能影响的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(10): 2327-2333.
- [12] 姚春意, 朱惠人, 付仲议, 等. 主流湍流度对涡轮导叶吸力面W型气膜孔冷却效率影响的实验研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(12): 2779-2787. (YAO Chun-yi, ZHU Hui-ren, FU Zhong-yi, et al. Experimental Investigation for Effects of Mainstream Turbulence on Film Cooling Effectiveness of W-Shaped Film Hole on Suction Side of a Turbine Guide Vane [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(12): 2779-2787.)
- [13] 王培泉, 郭昊雁, 李杰, 等. 涡轮导向叶片综合冷却效率实验研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(7): 1568-1576. (WANG Pei-xiao, GUO Hao-yan, LI Jie, et al. Experimental Investigation on Overall Cooling Effectiveness of Turbine Guide Vane [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(7): 1568-1576.)
- [14] 王敏敏, 赵熙, 林莉, 等. 纵向波纹隔热屏气膜冷却特性实验[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(12): 2648-2655.
- [15] 陈大为, 朱惠人, 李华太, 等. 尾迹对涡轮动叶全表面气膜冷却效率的影响[J]. *航空学报*, 2019, 40(3): 106-114.
- [16] Yang Z M, Zhang J Z. Experiment on Adiabatic Film Cooling Effectiveness in Front Zone of Effusion Cooling Configuration [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 31(3): 338-344.
- [17] Rouina S, Ravelli S, Barigozzi G. Combined Experimental and CFD Investigation of Flat Plate Film Cooling Through Fan Shaped Holes [J]. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, 2019, 4(2): 7-19.
- [18] 陈源, 江锦波, 彭旭东, 等. 干气密封力学系统动态性能及其影响因素间的交互作用分析[J]. *摩擦学报*, 2019, 39(3): 269-278.
- [19] 李强, 巩亚东, 梁彩霞, 等. 基于水基MQL的DD5单晶合金铣削表面粗糙度研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 9(39): 1293-1298.
- [20] Neriya Hegade K P, Natalia R, Wehba B, et al. Design and Study of Mini Wind Tunnel for Microsystems Fluid Interaction under Low Reynolds Number Flows [J]. *SN Applied Sciences*, 2020, 2(5).
- [21] Wang Z, Han X, He Y, et al. Investigation of Flame and Burner Plate Interaction During the Heat Flux Method Used for Laminar Burning Velocity Measurement [J/OL]. *Fuel*, <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2020>.
- [22] 范泽兵, 张向前, 王书福, 等. 航空发动机高空模拟试验正交设计研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2018, 31(4): 37-41.
- [23] 李苗苗, 李卓, 马亮亮, 等. 轴承配置对转子轴系振动特性的影响[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(6): 1209-1216.
- [24] 刘笃喜, 覃秋霞, 王新刚, 等. 基于正交实验的大气静压精密测量静压管设计[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(2): 360-367.

(编辑:张贺)