

二元收扩喷管设计参数对红外特征影响的数值研究

施小娟, 吉洪湖

(南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 采用正交试验设计方法进行排气系统红外辐射(IR)特征数值模拟算例的设计,研究了二元收扩喷管(2D-CD)喉部宽高比、喉部型面半径比、收敛半角和扩张半角等参数对排气系统红外辐射特征的影响,并且开展了参数对排气系统红外辐射特征影响灵敏度的分析。结果表明:扩张半角是影响二元排气系统红外辐射特征空间范围最宽的参数,收敛半角主要影响尾向 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围的红外辐射特征,喉部宽高比主要影响正尾向 0° 和侧向 90° 的红外辐射特征,喉部型面半径比对红外辐射特征的影响较小;二元排气系统不同方向上红外辐射特征的最主要影响参数不同,正尾向 0° 方向上的最主要影响参数是喉部宽高比,侧向 90° 方向上的最主要影响参数按影响程度大小排序依次为扩张半角、喉部宽高比。

关 键 词: 二元收扩喷管; 红外辐射特征; 正交试验; 灵敏度分析; 设计参数

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A

Numerical investigation of influence of two-dimensional convergent and divergent nozzle's design parameters on infrared characteristics

SHI Xiaojuan, JI Honghu

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The computational cases of infrared radiation (IR) characteristics of exhaust system were designed using the orthogonal experiment design method. The influences of geometric parameters on IR characteristics of two-dimensional exhaust system were investigated. The geometric parameters studied included throat width to height ratio, throat radius ratio, convergent half angle and divergent half angle of two-dimensional convergent and divergent (2D-CD) nozzle. The sensitivity analysis of the four geometric parameters was performed. Results showed that the divergent half angle was the widest parameter that influenced the spatial range of IR characteristics of 2D exhaust system. The convergent half angle mainly influenced IR characteristics within the range of $10^{\circ}-30^{\circ}$ in the tail direction. The throat width to height ratio mainly influenced the IR characteristics of 0° in the positive tail direction and 90° in the lateral direction. The throat radius ratio had little influence on the IR characteristics. The main influence parameters of IR characteristics in different directions of

收稿日期: 2019-12-02

作者简介: 施小娟(1982—),女,讲师,博士,主要从事航空发动机红外隐身技术研究。

引用格式: 施小娟,吉洪湖. 二元收扩喷管设计参数对红外特征影响的数值研究[J]. 航空动力学报,2020,35(5):944-955. SHI Xiaojuan,JI Honghu. Numerical investigation of influence of two-dimensional convergent and divergent nozzle's design parameters on infrared characteristics[J]. Journal of Aerospace Power,2020,35(5):944-955.

2D exhaust system were different. The most important influence parameter in the direction of 0° was throat width to height ratio. The most important influence parameters in the direction of 90° were divergent half angle and throat width to height ratio.

Key words: two-dimensional convergent and divergent nozzle; infrared radiation characteristics; orthogonal experiment; sensitivity analysis; geometric parameters

二元收扩排气系统是先进作战飞机发动机排气系统的一种重要型式,它具有较低的红外特征,容易实现矢量推进,且易与飞机后机身实现一体化设计,从而可减小底部阻力达到非加力超声速巡航^[1-3]。F-22 是世界上第一款投入使用的隐身战斗机,它采用的就是带有推力矢量的二元收扩排气系统^[4-6]。因此,研究二元收扩排气系统的红外辐射特征对于发展飞机的红外隐身技术以及提高作战飞机的战场生存力具有重要的作用^[7-8]。

关于二元排气系统可探测性和隐身方面的许多文献都属于军事敏感信息,国外很少有公开发表的技术文献。Stevens^[9]对 F-15 战斗机发动机分别安装二元收扩喷管和原始轴对称喷管在巡航状态下的红外辐射特征进行了预测。斯仁等^[10]分别数值计算了地面状态、外流马赫数为 1.14 状态下,基准轴对称收扩喷管和改型设计后带尾缘修形的二元收扩喷管的红外辐射特征。卢浩浩等^[11-13]试验研究了二元俯仰矢量排气系统分别在中心锥气膜冷却和喷管冲击-气膜冷却、不同涵道比下,几何偏转 0° 、 10° 、 20° 三种状态下的壁面温度分布与红外辐射特征。王杏涛等^[14]在整机模型上,数值计算了轴对称收扩喷管和二元收扩喷管在外流马赫数分别为 0.85 和 1.5 状态下的红外辐射特征。额日其太等^[15]在高速热喷流条件下,对涡喷形式的矩形截面简单二元收扩喷管扩张段壁面的冷却和 30° 方向的红外辐射特征进行了试验研究,试验模型包括基准轴对称收扩喷管、带孔缝冷却结构的二元收扩喷管、带波纹板冷却结构的二元收扩喷管。以上文献多是在特定的工作状态下,研究二元收扩喷管的红外辐射特征及其相对基准轴对称喷管的红外抑制效果;而未从二元收扩喷管的型面设计出发,开展几何参数对排气系统红外辐射特征的影响规律研究。

本文在地面静止状态,数值研究了带加力燃烧室的二元收扩排气系统在非加力情况下的红外辐射特征,以及收扩喷管喉部宽高比、喉部型面半径比、收敛半角和扩张半角等参数对排气系统红外辐射特征的影响。本文的研究结果表明:总体

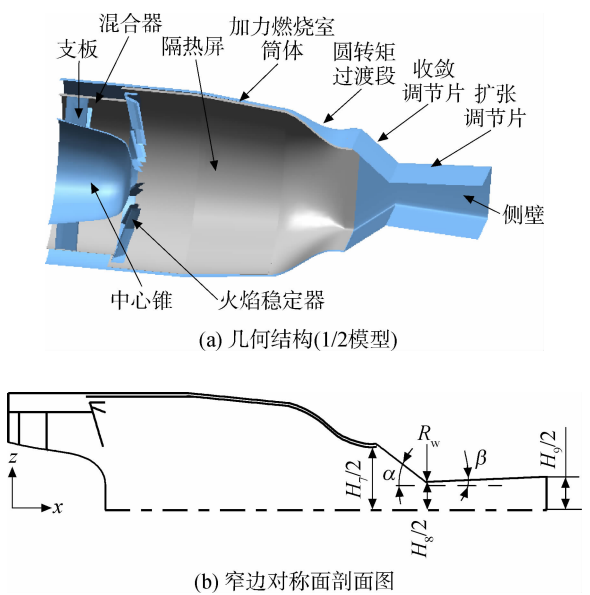
而言,扩张半角是影响二元排气系统红外辐射特征空间范围最宽的参数;二元排气系统不同方向上红外辐射特征的最主要影响参数不同,正尾向 0° 方向上的最主要影响参数是喉部宽高比,侧向 90° 方向上的最主要影响参数按影响程度大小依次为扩张半角、喉部宽高比。

1 研究模型及算例设计

1.1 几何模型和主要设计参数

二元收扩排气系统的几何模型如图 1(a) 所示,包括发动机末级涡轮出口下游的所有结构,如中心锥、支板、加力燃烧室、圆转矩过渡段、收扩喷管段等,其中收扩喷管段由两块平行的侧板和上下两块收扩调节片组成,收扩调节片是可调的,实现喷管喉部面积和出口面积的变化。在排气系统窄边和宽边对称面剖面图 1(b) 和图 1(c) 中, W 表示喷管侧壁宽度, H_7 、 H_8 和 H_9 分别表示喷管进口高度、喉部高度和出口高度, R_w 为喉部型面圆弧半径, α 为收敛半角, β 为扩张半角。

作者在文献[16]中,保持喷管进口、喉部和出口面积不变,研究了超椭圆型面圆转矩过渡段长径比、横截面积变化率、长半轴变化率、短半轴变



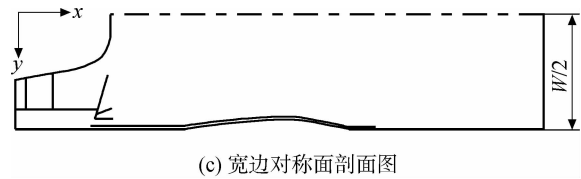


图 1 二元收扩排气系统几何模型示意图

Fig. 1 Geometric model of 2D-CD exhaust system

化率,以及喷管段喉部宽高比 AR (量符号记为 $R_a, R_a=W/H_8$)、喉部型面半径比 R_w/R_8 (R_8 为喉部当量半径)、收敛半角 α 、扩张半角 β 等 8 个设计参数对二元收扩喷管气动性能的影响,结果表明二元收扩喷管的气动性能几乎与过渡段型面无关。本文在文献[16]的基础上,保持收扩喷管段上游结构不变,同时喷管进口、喉部和出口面积不变,研究收扩喷管段喉部宽高比 R_a 、喉部型面半径比 R_w/R_8 、收敛半角 α 和扩张半角 β 等 4 个设计参数对排气系统红外辐射特征的影响。

参考文献[16],本文选取二元收扩喷管喉部宽高比 R_a 为 4 水平,分别为 3.49、4.24、5、6;喉部型面半径比 R_w/R_8 为 4 水平,分别为 0、0.1、0.2、0.3;收敛半角 α 为 4 水平,分别为 15° 、 25° 、

38.42° 、 45° ;扩张半角 β 为 4 水平,分别为 2° 、 3.24° 、 9° 、 15° 。

1.2 基于正交试验法的算例设计

R_a 、 R_w/R_8 、 α 和 β 的因素水平表如表 1 所示,4 因素 4 水平可选择正交表 $L_{16}(4^5)$,把各因素各水平按照正交表的要求安排在正交表的各行各列上^[17],确定二元收扩喷管设计参数对排气系统红外特征影响研究的算例为 16 个,各个喷管模型参数水平组合参见表 2。

表 1 二元收扩喷管设计参数的因素水平表

Table 1 Factors and levels of 2D-CD nozzle's design parameters

因素水平	设计参数			
	R_a	R_w/R_8	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$
1	4.24	0	38.42	3.24
2	3.49	0.2	45	9
3	5	0.1	25	15
4	6	0.3	15	2

表 2 基于正交试验法的二元收扩喷管算例设计

Table 2 Computational cases of 2D-CD nozzle based on orthogonal experiment design method

排气系统 模型	设计参数				空白列
	R_a	R_w/R_8	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$	
1	4.24	0	38.42	3.24	水平 1
2	4.24	0.2	45	9	水平 2
3	4.24	0.1	25	15	水平 3
4	4.24	0.3	15	2	水平 4
5	3.49	0	45	15	水平 4
6	3.49	0.2	38.42	2	水平 3
7	3.49	0.1	15	3.24	水平 2
8	3.49	0.3	25	9	水平 1
9	5	0	25	2	水平 2
10	5	0.2	15	15	水平 1
11	5	0.1	38.42	9	水平 4
12	5	0.3	45	3.24	水平 3
13	6	0	15	9	水平 3
14	6	0.2	25	3.24	水平 4
15	6	0.1	45	2	水平 1
16	6	0.3	38.42	15	水平 2

2 计算方法

按照 $L_{16}(4^5)$ 正交表中喷管模型 1~16(参考表 2)的设计参数水平组合对二元收扩排气系统进行建模、流场数值模拟、红外辐射特征数值模拟,确定各个喷管红外辐射特征的空间分布。

排气系统红外辐射特征计算首先需要进行排气系统内外流场计算,流场计算为红外辐射特征计算提供排气系统内外燃气流的压力和温度分布、固体部件的温度分布、吸收发射性介质的组分质量分数分布等数据。

下面分别阐述排气系统的流场计算和红外辐射特征计算方法,包括计算域、网格划分、边界条件等。

2.1 流场计算方法

排气系统流场计算采用 Fluent 软件,运用耦合显式求解器进行求解,湍流模拟采用 SST (shear stress transport) $k-\omega$ 湍流模型,燃气组分的质量分数场计算采用组分输运模型,辐射换热计算采用 DO(discrete ordinates)辐射模型,计算方法的验证同文献[16]。

2.1.1 计算域与网格划分

由于二元收扩排气系统在宽度和高度方向都具有对称性,因而流场计算选取 1/4 排气系统模型,外流场计算域为 1/4 圆柱体,其半径为 $10D_9$ (D_9 为喷管出口当量直径),高为 $40D_9$ 。

以基准二元排气系统(参见表 2 中排气系统模型 1,其中 $R_a=4.24$ 、 $R_w/R_8=0$ 、 $\alpha=38.42^\circ$ 、 $\beta=3.24^\circ$)为例,图 2 给出了其排气系统窄边对称面以及排气系统腔体内的流场计算网格,经过网格独立性验证,1/4 计算域网格总数达到 260 万。

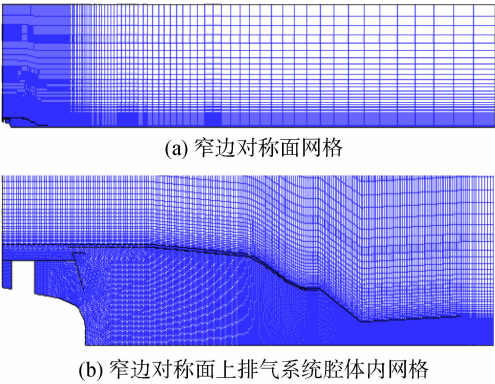


图 2 基准二元排气系统流场计算网格
Fig. 2 Flow field computational mesh of basic 2D exhaust system

整个计算域采用分块网格,大部分分块都是结构化网格;并且对排气系统腔体内、喷口后射流区域以及近壁区进行网格加密,大部分固体部件采用的是四边形的面网格。

2.1.2 边界条件

本文计算二元收扩排气系统在地面静止条件非加力情况下的流场,排气系统内、外涵进口设置为压力进口边界,给定总压、总温,并且由该涡扇发动机的空气流量及非加力时的燃油流量求得内涵进口燃气组分(CO_2 、 H_2O 、 CO 和 O_2 等)的质量分数 $w^{[18]}$;外流场边界设置为压力出口边界,其压力和温度为环境大气的压力和温度,具体见表 3 所示。排气系统宽边和窄边对称面设置为对称边界;中心锥和支板设置为绝热壁面,其他固体部件均设置为气固耦合传热边界,且在辐射换热计算中所有固体部件的发射率均设置为 0.9。

表 3 二元排气系统流场计算边界条件
Table 3 Flow field boundary conditions of 2D exhaust system

边界名称	边界条件设置
内涵进口	总压 $p_{\text{main-duct}}^*$, 总温 $T_{\text{main-duct}}^*$,
	$w_{\text{CO}_2}=0.072, w_{\text{H}_2\text{O}}=0.0295,$
	$w_{\text{CO}}=0.0001, w_{\text{O}_2}=0.1385$
外涵进口	总压 p_{bypass}^* , 总温 T_{bypass}^* ,
	$w_{\text{CO}_2}=w_{\text{H}_2\text{O}}=w_{\text{CO}}=0, w_{\text{O}_2}=0.233$
外流边界	静压 101325 Pa, 静温 300 K,
	$w_{\text{CO}_2}=w_{\text{H}_2\text{O}}=w_{\text{CO}}=0, w_{\text{O}_2}=0.233$

2.2 红外辐射特征计算方法

排气系统红外辐射特征计算采用本课题组开发的红外辐射特征计算软件 NUAA-IR(numerical analysis of aircraft's infrared signature)^[19],采用反向蒙特卡罗法,考虑了喷管内固体部件的发射和反射以及燃气组分 CO_2 、 H_2O 和 CO 对红外辐射的吸收和发射。

2.2.1 计算域与网格划分

根据排气系统流场计算结果,设定红外辐射特征计算域为圆柱体,相比流场计算域,红外计算域的圆柱体直径减小,只需包含燃气流温度场的核心区。

红外计算域网格是在计算程序中自动生成的,由六面体和五面的棱柱体组成^[20],相比流场计算网格,固体部件的红外计算网格(如图 3 所

示)采用的均是三角形的面网格,且网格较稀疏,只在温度梯度较大的壁面上采用较细密的网格。

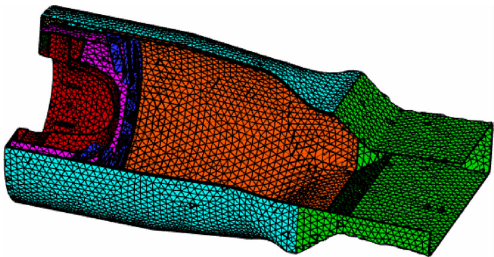


图 3 二元排气系统固体部件红外辐射特征计算网格
Fig. 3 IR characteristics computational mesh of solid components of 2D exhaust system

2.2.2 边界条件

红外辐射特征计算的方位角如图 4 所示,窄边探测面上方位角用 θ 表示,宽边探测面上方位角用 ϕ 表示, $\theta=0^\circ$ 是排气系统轴线的方向,即排气系统正尾向, $\theta=90^\circ$ 和 $\phi=90^\circ$ 是与排气系统轴线相垂直的两个方向,即排气系统侧向。

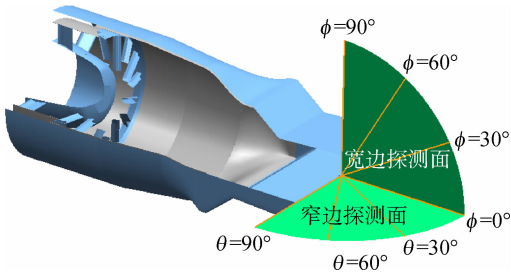


图 4 二元排气系统红外辐射特征计算方位角示意图
Fig. 4 IR characteristics computational azimuth of 2D exhaust system

本文计算分析了二元排气系统在尾向宽边探测面和窄边探测面 $0^\circ\sim90^\circ$ 范围内 $3\sim5\text{ }\mu\text{m}$ 波段的红外辐射特征,探测距离为 5 km ,未考虑大气对红外辐射的吸收和散射。固体部件的红外辐射主要取决于表面的温度分布和发射率,温度由流场计算结果提供,发射率设为 0.9 的灰体壁面;燃气流的红外辐射主要取决于燃气的温度、压力和组分质量分数分布等,它们均从流场计算结果中提取,燃气组分的吸收-发射特性采用 Ludwig 等^[21]提供的数据库。

3 计算结果与分析

为节省篇幅,下面简要分析二元收扩排气系统的温度和燃气组分质量分数场的分布、红外辐

射特征的空间分布,重点分析喷管设计参数对排气系统红外辐射特征的影响。

3.1 二元排气系统流场分布

以基准二元排气系统为例,图 5 和图 6 分别给出了窄边对称面上的无量纲温度分布(无量纲温度定义为 $\Theta = (T - T_a)/(T_{\text{max}} - T_a)$,其中 T_a 为环境温度, T_{max} 为燃气流的最高温度)和燃气组分 CO_2 的质量分数 w_{CO_2} 。由图可见:高温区主要集中在排气系统内部,从喷管喉道开始,温度明显降低;温度越高的区域, CO_2 的质量分数越高,在温度接近或等于环境温度的区域, CO_2 的质量分数为 0 。

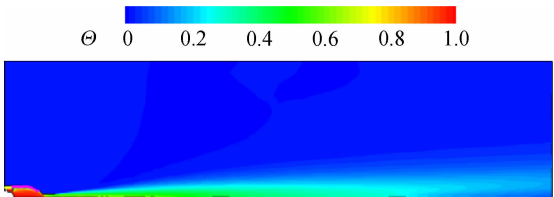


图 5 基准二元排气系统窄边对称面上无量纲温度
Fig. 5 Dimensionless temperature on narrow side symmetrical plane of basic 2D exhaust system

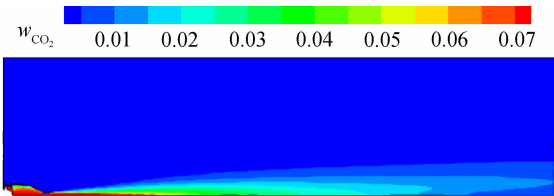


图 6 基准二元排气系统窄边对称面上 CO_2 质量分数
Fig. 6 Mass fraction of CO_2 on narrow side symmetrical plane of basic 2D exhaust system

3.2 二元排气系统红外辐射特征的空间分布

图 7 给出了基准二元排气系统无量纲积分辐射强度 $\bar{I} = I/I_{\text{max}}$ 的空间分布,其中 I_{max} 为二元排气系统的最大积分辐射强度。由图可见:①在 $0^\circ\sim15^\circ$ 范围内,固体部件是排气系统的主要红外辐射源,其红外辐射的最大值出现在 0° 方向;在 $15^\circ\sim90^\circ$ 范围内,燃气流是排气系统的主要红外辐射源,其红外辐射的最大值出现在 90° 方向;②排气系统宽边探测面的积分辐射强度在 $5^\circ\sim25^\circ$ 范围内小于窄边探测面的积分辐射强度,这是由于遮挡作用使得中心锥在宽边探测面的投影面积和红外辐射较少,同时宽边探测面燃气流的积分辐射强度也较小;排气系统宽边探测面的积分辐射强度在 $0^\circ\sim5^\circ$ 以及 $25^\circ\sim90^\circ$ 范围内大于窄边探测

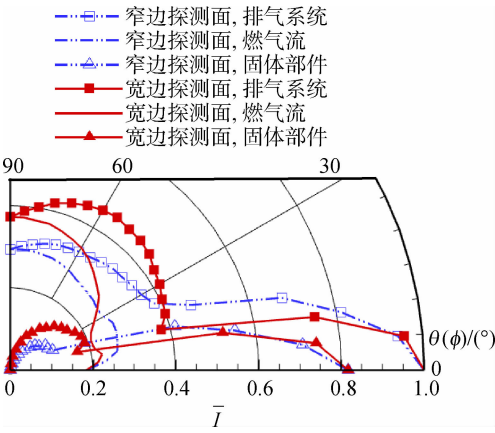


图 7 基准二元排气系统无量纲积分辐射强度空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of dimensionless radiation intensity of basic 2D exhaust system

面的积分辐射强度,这是由于扩张板在宽边探测面的投影面积和红外辐射较大,且大角度范围内宽边探测面燃气流的积分辐射强度也较大。

3.3 设计参数对二元排气系统红外辐射特征的影响

在分析几何参数对红外辐射特征的影响时,选取 11 个方向的积分辐射强度作为目标函数,这 11 个方向分别为: $\theta=0^\circ$,宽边探测面 $\phi=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$,窄边探测面 $\theta=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 。下文分别对 11 个方向的积分辐射强度进行直观分析和参数的灵敏度分析,研究收扩喷管段几何参数对二元排气系统红外辐射特征的影响,以及各个方向红外辐射特征影响的主要因素。

3.3.1 红外辐射特征的直观分析

这里以排气系统尾向 $\theta=0^\circ$ 和 $\phi=10^\circ$ 方向为例,对其无量纲积分辐射强度 $\bar{I}_{\theta=0^\circ}$ 和 $\bar{I}_{\phi=10^\circ}$ 进行直观分析,如表 4 所示。表中 K_i 表示任一系列上水平号为 i ($i=1, 2, 3, 4$) 时所对应的无量纲积分辐射强度之和; k_i 表示任一系列上因素取水平 i 时所得无量纲积分辐射强度之和的算术平均值。 R 为极差,在任一系列上, R 定义为 $R=\max\{k_1, k_2, k_3, k_4\}-\min\{k_1, k_2, k_3, k_4\}$,极差 R 越大表示该参数的水平变化对目标函数的影响越大;表中存在一系列空白列(即不安排因素或交互作用的列),在直观分析时为对所做试验有更多的认识,可将空白列的极差一并算出。尾向其他方向红外辐射特征的直观分析方法与此相同,不再赘述。

图 8 给出了因素与指标的趋势图,反映各个因素水平变化对 11 个方向积分辐射强度的影响,图 8 中横坐标分别为 $R_a, R_w/R_s, \alpha$ 和 β 的水平,纵

坐标为各个方向无量纲积分辐射强度在各个水平下的平均值 k_i 。由图 8 可见:

1) 喉部宽高比 R_a 对各个方向红外辐射特征的影响为:① R_a 主要影响 $0^\circ\sim 30^\circ$ 方向的红外辐射特征,此角度范围内主要是固体部件的红外辐射,在 $\theta=0^\circ$ 方向、宽边探测面 $\phi=10^\circ, 20^\circ$ 和 30° 方向的红外辐射特征均是随着 R_a 的增大而减小,尤其是在 $\theta=0^\circ$ 方向的减小幅度最大,这主要是因为随着 R_a 的增大,喷管对高温部件的遮挡作用更加明显;而在窄边探测面 $\theta=20^\circ$ 方向上,红外辐射特征随着 R_a 的增大而增大,在此方向上主要是隔热屏的红外辐射,随着 R_a 的增大,隔热屏过渡段侧壁附近产生了流动分离造成隔热屏过渡段侧壁温度增大,从而造成此方向的红外辐射增大;② 在 $60^\circ\sim 90^\circ$ 方向范围内, R_a 对红外辐射特征的影响比较小,此角度范围内主要是燃气流的红外辐射,在宽边探测面 $\phi=90^\circ$ 方向上,红外辐射特征随着 R_a 的增大而增大,在窄边探测面 $\theta=90^\circ$ 方向上,红外辐射特征随着 R_a 的增大而减小,这主要是因为 在 90° 方向上,只存在燃气流的红外辐射,同时也只有喷口后燃气射流可见,随着 R_a 的增大,宽边探测面上探测到的燃气流的面积增大,而窄边探测面上探测到的燃气流的面积减小。

2) 喉部型面半径比 R_w/R_s 对各个方向红外辐射特征的影响较小。

3) 收敛半角 α 对各个方向红外辐射特征的影响为:① α 主要影响 $10^\circ\sim 30^\circ$ 方向的红外辐射特征,在这些方向上,红外辐射特征随着 α 的减小而减小;② 在 $\theta=0^\circ$ 方向上,当 $\alpha=38.42^\circ$ 时,其红外辐射特征较小些。

4) 扩张半角 β 对各个方向红外辐射特征的影响为:① 在 $0^\circ\sim 20^\circ$ 方向范围内,在宽边探测面和窄边探测面上,总体上是,红外辐射特征随着 β 的减小而减小;② 在 $60^\circ\sim 90^\circ$ 方向范围内,在宽边探测面上,当 $\beta=15^\circ$ 时红外辐射特征较小;而在窄边探测面上,当 $\beta=2^\circ$ 时红外辐射特征较小。

3.3.2 参数的灵敏度分析

本节利用 Isight 软件,对 $R_a, R_w/R_s, \alpha$ 和 β 等几何参数对二元排气系统 $\theta=0^\circ$ 、宽边探测面 $\phi=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 、窄边探测面 $\theta=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 等 11 个方向的红外辐射特征影响的灵敏度进行分析,采用的 16 组样本点如表 5 所示,表中排气系统模型 1~16 所对应的几何参数 $R_a, R_w/R_s, \alpha$ 和 β 的数值可参考表 2。

表 4 收扩喷管段几何参数对 $\theta=0^\circ$ 和 $\phi=10^\circ$ 方向红外特征影响的直观分析

Table 4 Direct analysis of influence of nozzle's design parameters to IR characteristics in the direction of $\theta=0^\circ$ and $\phi=10^\circ$

排气系统		设计参数				红外特征		
模型		R_a	R_w/R_s	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	空白列	$\bar{I}_{\theta=0^{\circ}}$	$\bar{I}_{\phi=10^{\circ}}$
1		4.24	0	38.42	3.24	水平 1	0.82114	0.48387
2		4.24	0.2	45	9	水平 2	0.75057	0.67155
3		4.24	0.1	25	15	水平 3	0.75256	0.57839
4		4.24	0.3	15	2	水平 4	0.73969	0.3091
5		3.49	0	45	15	水平 4	0.8154	0.65981
6		3.49	0.2	38.42	2	水平 3	0.72373	0.38186
7		3.49	0.1	15	3.24	水平 2	0.80635	0.38735
8		3.49	0.3	25	9	水平 1	0.81581	0.60356
9		5	0	25	2	水平 2	0.67868	0.3728
10		5	0.2	15	15	水平 1	0.73839	0.44591
11		5	0.1	38.42	9	水平 4	0.74294	0.58736
12		5	0.3	45	3.24	水平 3	0.6867	0.50495
13		6	0	15	9	水平 3	0.68128	0.51941
14		6	0.2	25	3.24	水平 4	0.6893	0.44147
15		6	0.1	45	2	水平 1	0.70634	0.43141
16		6	0.3	38.42	15	水平 2	0.58408	0.60462
$\bar{I}_{\theta=0^{\circ}}$	K_1	3.06395	2.9965	2.87188	3.00349	3.08167		
	K_2	3.16128	2.90198	2.95901	2.9906	2.81968		
	K_3	2.84672	3.00818	2.93635	2.89043	2.84427		
	K_4	2.661	2.82629	2.96571	2.84844	2.98734		
	k_1	0.76599	0.74913	0.71797	0.75087	0.77042		
	k_2	0.79032	0.7255	0.73975	0.74765	0.70492		
	k_3	0.71168	0.75205	0.73409	0.72261	0.71107		
	k_4	0.66525	0.70657	0.74143	0.71211	0.74683		
	R	0.12507	0.04547	0.02346	0.03876	0.0655		
$\bar{I}_{\phi=10^{\circ}}$	K_1	2.04292	2.03588	2.0577	1.81763	1.96475		
	K_2	2.03258	1.94079	2.26771	2.38189	2.03632		
	K_3	1.91102	1.98451	1.99622	2.28873	1.9846		
	K_4	1.99689	2.02223	1.66177	1.49516	1.99773		
	k_1	0.51073	0.50897	0.51443	0.45441	0.49119		
	k_2	0.50814	0.4852	0.56693	0.59547	0.50908		
	k_3	0.47775	0.49613	0.49905	0.57218	0.49615		
	k_4	0.49922	0.50556	0.41544	0.37379	0.49943		
	R	0.03297	0.02377	0.15149	0.22168	0.01789		

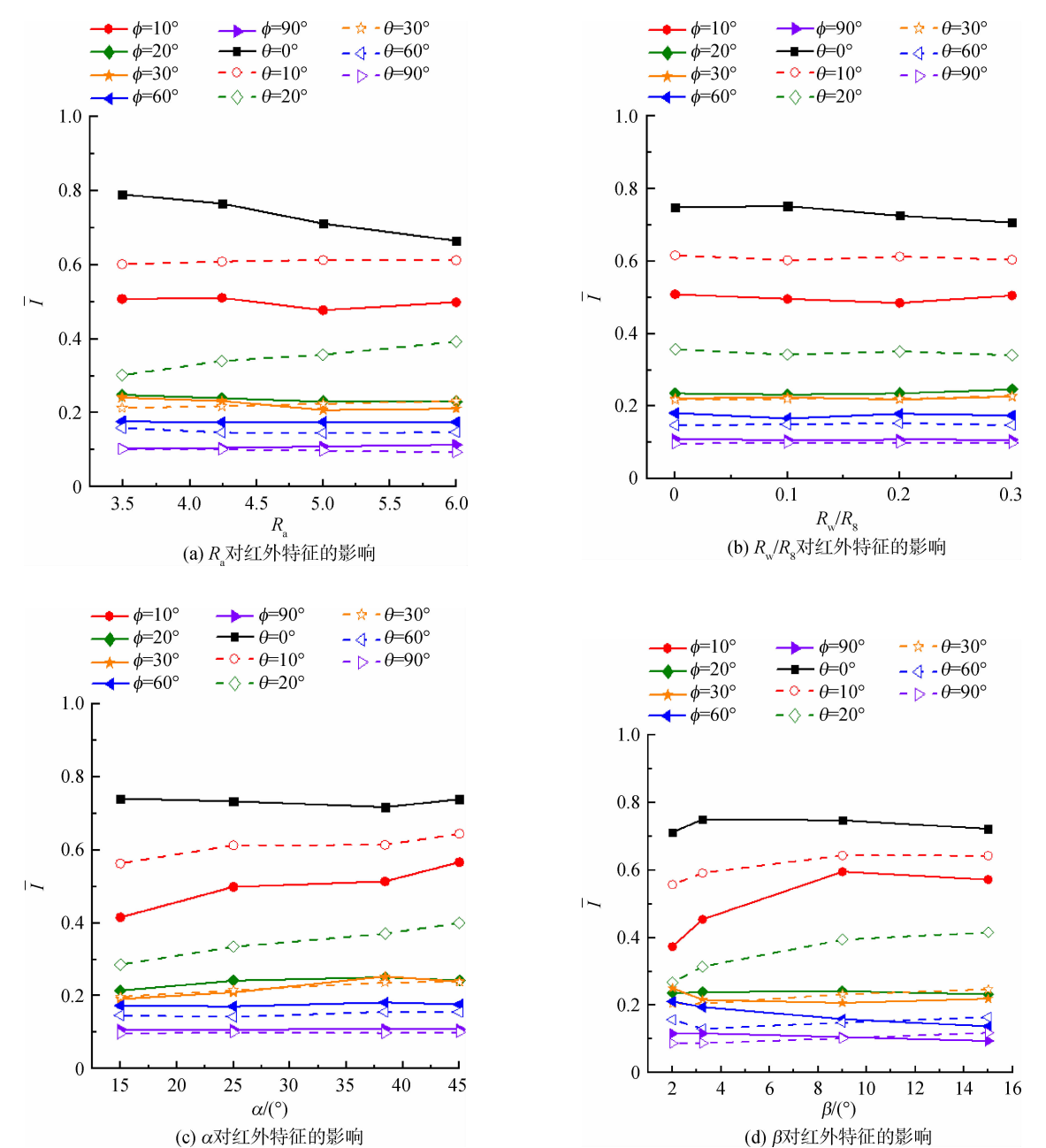


图 8 几何参数对二元排气系统红外特征的影响

Fig. 8 Influence of geometric parameters on IR characteristics of 2D exhaust system

图 9~图 19 分别给出了 R_a 、 R_w/R_8 、 α 和 β 等几何参数对二元排气系统 $\theta=0^\circ$ 、宽边探测面 $\phi=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 、窄边探测面 $\theta=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 等 11 个方向的红外辐射特征影响的 Pareto 图,图中横坐标表示各参数对红外辐射特征影响程度的百分比;填充图代表正效应,即几何参数增大时,某一方向的红外辐射特征也增大,未填充图代表负效应;“-”代表参数之间的交互作用;平方项代表该参数对红外辐射特征的影响具有非线性。由图可见

1) 二元排气系统不同方向上红外辐射特征

的最主要影响参数不同,如 0° 方向上的最主要影响参数是 R_a ,宽边探测面和窄边探测面 10° 方向上的最主要影响参数按影响程度大小排序均是 β 和 α ,宽边探测面和窄边探测面 90° 方向上的最主要影响参数按影响程度大小排序均是 β 和 R_a 。

2) 总体而言, β 是影响二元排气系统大多数方向上红外辐射特征的最主要参数,即 β 是影响二元排气系统红外辐射特征空间范围最宽的参数,窄边探测面上不同方向的红外辐射特征随着 β 的减小而减小,宽边探测面大方位角方向上红

外辐射特征随着 β 的增大而减小。

3) α 主要影响 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围的红外辐射,红
外辐射特征随着 α 的减小而减小。

4) R_a 主要影响 0° 和 90° 方向的红外辐射, 0°
和窄边探测面 90° 方向的红外辐射特征随着 R_a
的增大而减小,而宽边探测面 90° 方向的红外辐
射特征随着 R_a 的减小而减小。

表 5 二元排气系统在尾向各方向无量纲积分辐射强度的样本点

Table 5 Sample points of dimensionless radiation intensity in the opposite direction of 2D exhaust system

排气系统 模型	$\bar{I}_{\theta=0^{\circ}}$	$\bar{I}_{\phi=10^{\circ}}$	$\bar{I}_{\phi=20^{\circ}}$	$\bar{I}_{\phi=30^{\circ}}$	$\bar{I}_{\phi=60^{\circ}}$	$\bar{I}_{\phi=90^{\circ}}$	$\bar{I}_{\theta=10^{\circ}}$	$\bar{I}_{\theta=20^{\circ}}$	$\bar{I}_{\theta=30^{\circ}}$	$\bar{I}_{\theta=60^{\circ}}$	$\bar{I}_{\theta=90^{\circ}}$
1	0.82114	0.48387	0.25273	0.23624	0.20525	0.11457	0.6067	0.33902	0.21459	0.12359	0.08981
2	0.75057	0.67155	0.24161	0.24045	0.16079	0.10426	0.68198	0.43731	0.24679	0.15676	0.10599
3	0.75256	0.57839	0.24384	0.21684	0.13812	0.09131	0.63828	0.38634	0.23553	0.16138	0.12319
4	0.73969	0.3091	0.22195	0.23604	0.19609	0.11297	0.50817	0.19994	0.17670	0.14833	0.08749
5	0.8154	0.65981	0.24381	0.25633	0.1341	0.09227	0.681	0.43979	0.24527	0.17676	0.12153
6	0.72373	0.38186	0.26874	0.29547	0.23781	0.11393	0.55696	0.24407	0.21031	0.18329	0.09128
7	0.80635	0.38735	0.21628	0.21692	0.18208	0.11179	0.53174	0.1951	0.17145	0.13798	0.08868
8	0.81581	0.60356	0.26601	0.19851	0.15442	0.09849	0.63789	0.32782	0.22688	0.1412	0.10868
9	0.67868	0.3728	0.22544	0.23313	0.20995	0.11835	0.57139	0.26735	0.19829	0.14454	0.08522
10	0.73839	0.44591	0.20032	0.14974	0.13797	0.09323	0.60768	0.3671	0.22678	0.15258	0.11779
11	0.74294	0.58736	0.24023	0.22759	0.14493	0.10677	0.64914	0.42924	0.24417	0.15003	0.10069
12	0.6867	0.50495	0.25635	0.22092	0.20928	0.11857	0.62438	0.36586	0.22969	0.13647	0.08957
13	0.68128	0.51941	0.22018	0.16262	0.17652	0.11290	0.60674	0.38248	0.21388	0.1482	0.09392
14	0.6893	0.44147	0.23205	0.19023	0.18227	0.12203	0.60512	0.35801	0.20182	0.12299	0.08413
15	0.70634	0.43141	0.22761	0.2395	0.20174	0.11929	0.59251	0.35918	0.23143	0.15348	0.08661
16	0.58408	0.60462	0.24295	0.25368	0.13992	0.10192	0.64562	0.47035	0.28028	0.16845	0.11163

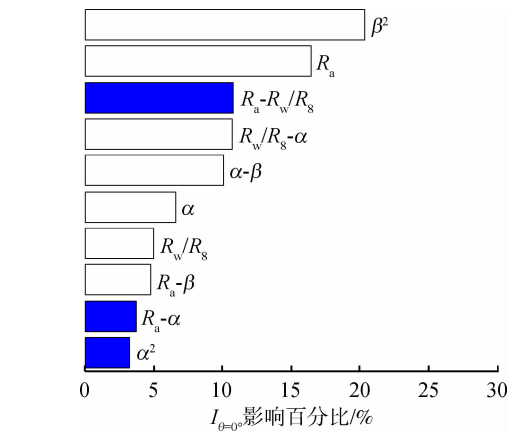


图 9 几何参数对 $I_{\theta=0^{\circ}}$ 影响的 Pareto 图

Fig. 9 Pareto chart of influence of geometric parameters to $I_{\theta=0^{\circ}}$

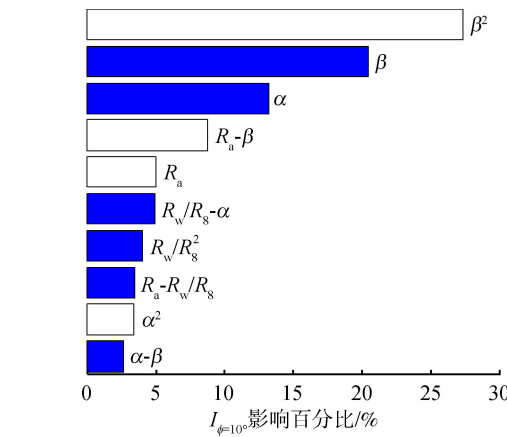


图 10 几何参数对 $I_{\phi=10^{\circ}}$ 影响的 Pareto 图

Fig. 10 Pareto chart of influence of geometric parameters to $I_{\phi=10^{\circ}}$

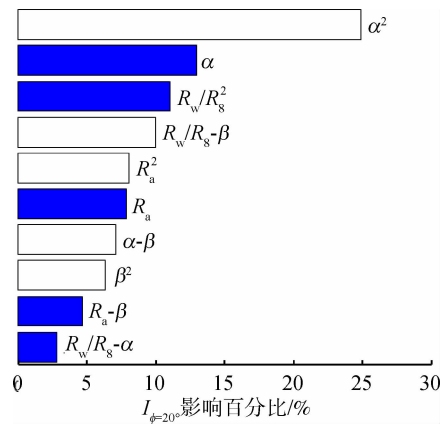


图 11 几何参数对 $I_{\phi=20^\circ}$ 影响的 Pareto 图
Fig. 11 Pareto chart of influence of geometric parameters to $I_{\phi=20^\circ}$

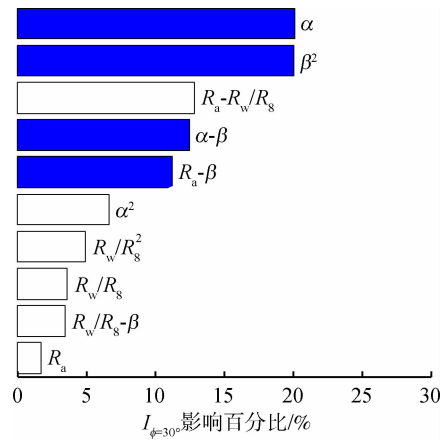


图 12 几何参数对 $I_{\phi=30^\circ}$ 影响的 Pareto 图
Fig. 12 Pareto chart of influence of geometric parameters to $I_{\phi=30^\circ}$

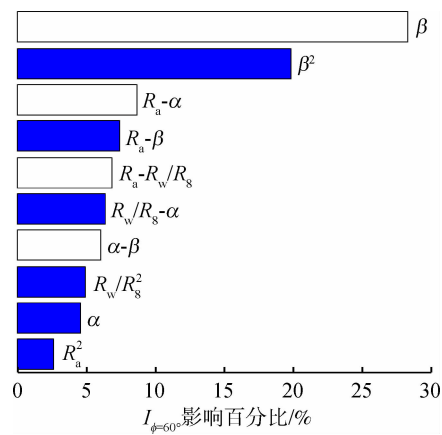


图 13 几何参数对 $I_{\phi=60^\circ}$ 影响的 Pareto 图
Fig. 13 Pareto chart of influence of geometric parameters to $I_{\phi=60^\circ}$

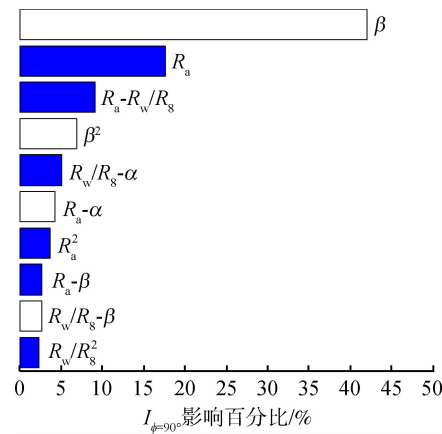


图 14 几何参数对 $I_{\phi=90^\circ}$ 影响的 Pareto 图
Fig. 14 Pareto chart of influence of geometric parameters to $I_{\phi=90^\circ}$

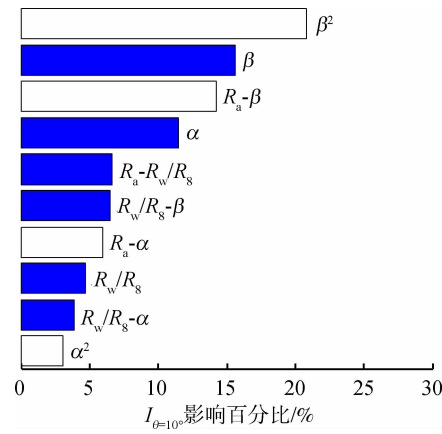


图 15 几何参数对 $I_{\theta=10^\circ}$ 影响的 Pareto 图
Fig. 15 Pareto chart of influence of geometric parameters to $I_{\theta=10^\circ}$

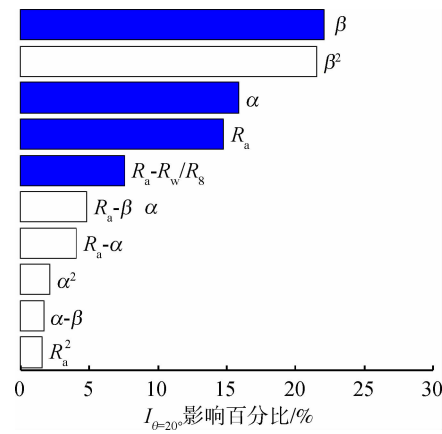


图 16 几何参数对 $I_{\theta=20^\circ}$ 影响的 Pareto 图
Fig. 16 Pareto chart of influence of geometric parameters to $I_{\theta=20^\circ}$

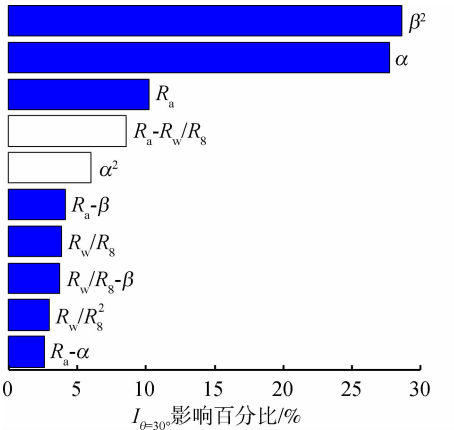


图 17 几何参数对 $I_{\theta=30^\circ}$ 影响的 Pareto 图
Fig. 17 Pareto chart of influence of geometric parameters to $I_{\theta=30^\circ}$

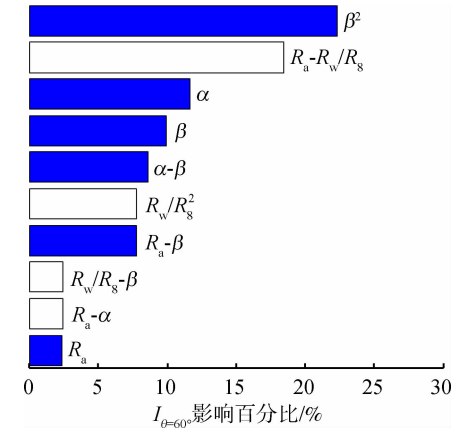


图 18 几何参数对 $I_{\theta=60^\circ}$ 影响的 Pareto 图
Fig. 18 Pareto chart of influence of geometric parameters to $I_{\theta=60^\circ}$

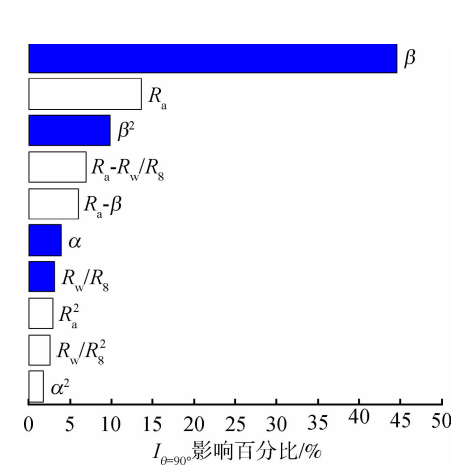


图 19 几何参数对 $I_{\theta=90^\circ}$ 影响的 Pareto 图
Fig. 19 Pareto chart of influence of geometric parameters to $I_{\theta=90^\circ}$

4 结 论

本文在地面静止状态,收扩喷管进口面积、喉部面积和出口面积保持不变,采用正交试验设计方法进行二元排气系统流场和红外辐射特征数值模拟算例的设计,开展了二元收扩喷管喉部宽高比 R_a 、喉部型面半径比 R_w/R_8 、收敛半角 α 和扩张半角 β 等参数对排气系统红外辐射特征影响规律的研究。结论如下:

1) 总体而言,扩张半角 β 是影响二元排气系统红外辐射特征空间范围最宽的参数,窄边探测面上不同方向的红外辐射特征随着 β 的减小而减小,宽边探测面大方位角方向上红外辐射特征随着 β 的增大而减小;收敛半角 α 主要影响尾向 $10^\circ\sim30^\circ$ 范围的红外辐射,红外辐射特征随着 α 的减小而减小;喉部宽高比 R_a 主要影响正尾向 0° 和侧向 90° 方向的红外辐射, 0° 和窄边探测面 90° 方向的红外辐射强度随着 R_a 的增大而减小,宽边探测面 90° 方向的红外辐射特征随着 R_a 的减小而减小;喉部型面半径比 R_w/R_8 对红外辐射的影响较小。

2) 二元排气系统不同方向上红外辐射特征的最主要影响参数不同,正尾向 0° 方向上的最主要影响参数是 R_a ,尾向 10° 方向上的最主要影响参数按影响程度大小排序是 β 和 α ,侧向 90° 方向上的最主要影响参数按影响程度大小排序是 β 和 R_a 。

参考文献:

[1] CAPONE F J. The nonaxisymmetric nozzle; it is for real [R]. AIAA 79-1810, 1979.

[2] 季鹤鸣,雷雨冰,邵万仁. 二元收扩喷管的方案设计与试验研究[J]. 航空发动机, 1995, 21(4): 8-13.

JI Heming, LEI Yubing, SHAO Wanren. Concept design and experimental study of the 2D-CD nozzle [J]. Aero-engine, 1995, 21(4): 8-13. (in Chinese)

[3] 廉筱纯,吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2005.

[4] 吉洪湖. 飞发一体化设计中的发动机隐身问题[J]. 航空动力, 2018(2): 67-71.

JI Honghu. Fundamental issues of aircraft/engine integration for low observability[J]. Aerospace Power, 2018(2): 67-71. (in Chinese)

[5] 邓洪伟,金文栋,叶留增,等. 二元矢量喷管内外流场数值计算与隐身性分析[J]. 航空科学技术, 2012(1): 45-48.

DENG Hongwei, JIN Wendong, YE Liuzeng, et al. Numerical simulation of two-dimensional nozzle and analysis of its stealth technology[J]. Aeronautical Science and Technology

gy,2012(1):45-48. (in Chinese)

[6] CLINE J,BEHM D,KIDD K,et al. F/A-22 IR signature flight test model validation [J]. Aircraft Survivability, 2003,3:9-11.

[7] PATERSON J. Overview of low observable technology and its effects on combat aircraft survivability[J]. Journal of Aircraft,1999,36(2):380-388.

[8] DECHOR R. Infrared emission from turbofans with high aspect ratio nozzles[R]. AIAA 81-4319,1981.

[9] STEVENS H L. F-15/nonaxisymmetric nozzle system integration study support program[R]. NASA CR-135252, 1978.

[10] 斯仁,吉洪湖,刘常春,等. 冷却抑制二元收扩喷管红外特征模型实验与数值研究[J]. 推进技术,2014,35(4):463-469.

SI Ren,JI Honghu,LIU Changchun,et al. Model experiment and numerical analysis on infrared character and infrared suppression by cooling of two-dimensional convergent-divergent nozzle[J]. Journal of Propulsion Technology,2014,35(4):463-469. (in Chinese)

[11] 卢浩浩,吉洪湖,刘健,等. 二元俯仰矢量排气系统红外特征模拟实验研究[J]. 航空动力学报,2017,32(8):1861-1868.

LU Haohao,JI Honghu,LIU Jian,et al. Experiment on infrared signature of two dimensional convergent-divergent vectoring nozzle exhaust system[J]. Journal of Aerospace Power,2017,32(8):1861-1868. (in Chinese)

[12] 卢浩浩,吉洪湖,王丁,等. 部件冷却对二元俯仰矢量排气系统红外特征抑制实验[J]. 航空动力学报,2017,32(9):2070-2079.

LU Haohao,JI Honghu,WANG Ding,et al. Experiment on infrared characteristics suppression by component cooling of two-dimensional convergent-divergent vectoring nozzle exhaust system[J]. Journal of Aerospace Power, 2017,32(9):2070-2079. (in Chinese)

[13] 卢浩浩,吉洪湖,刘健,等. 涵道比对二元俯仰矢量排气系统红外特征影响的实验研究[J]. 红外技术,2017,39(7):648-652.

LU Haohao,JI Honghu,LIU Jian,et al. Experiment investigation of infrared radiation characteristics of two-dimensional convergent-divergent vectoring nozzle exhaust system on different bypass ratio states[J]. Infrared Technology,2017,39(7):648-652. (in Chinese)

[14] 王杏涛. 飞行器红外辐射特征及发动机舱蒙皮降温规律研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.

WANG Xingtao. Research on infrared radiation performance of air vehicle and temperature reduction disciplinarian of engine nacelle skin[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2015. (in Chinese)

[15] 额日其太,王志杰,吴寿生. 高速热喷流条件下二元收扩喷管扩张段壁面冷却的初步试验研究. 航空动力学报,2002,17(1):40-44.

Eriqitai, WANG Zhijie, WU Shousheng. Preliminary experimental investigation on the divergent wall cooling of two dimensional C-D nozzles at high speed and hot jet conditions[J]. Journal of Aerospace Power,2002,17(1):40-44. (in Chinese)

[16] 施小娟,吉洪湖,斯仁. 二元收扩喷管设计参数对气动性能影响的数值研究[J]. 航空动力学报,2016,31(8):1799-1810.

SHI Xiaojuan,JI Honghu,SI Ren. Numerical investigation of geometric parameters' influence to aerodynamic performance of two dimensional convergent and divergent nozzle[J]. Journal of Aerospace Power,2016,31(8):1799-1810. (in Chinese)

[17] 邱轶兵,张文利,闵凡飞,等. 试验设计与数据处理[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2008.

[18] 施小娟. 涡扇发动机收敛喷管红外辐射特征及射抑制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.

SHI Xiaojuan. Investigation of infrared radiation characteristic of convergent nozzle in turbofan engine and ejector's suppressing technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2007. (in Chinese)

[19] 黄伟,吉洪湖. 基于 BRDF 的排气系统红外辐射特征计算研究[J]. 航空学报,2012,33(7):1227-1235.

HUANG Wei,JI Honghu. Computational investigation of infrared radiation characteristics of exhaust system based on BRDF [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012,33(7):1227-1235. (in Chinese)

[20] 黄伟,吉洪湖,斯仁,等. 涡扇发动机排气系统红外特征[J]. 推进技术,2010,31(6):745-750.

HUANG Wei,JI Honghu,SI Ren,et al. Infrared characteristics calculating of turbofan engine exhaust system[J]. Journal of Propulsion Technology,2010,31(6):745-750. (in Chinese)

[21] LUDWIG C B, MALKMUS W, REARDONJ E, et al. Handbook of infrared radiation from combustion gases [R]. NASA-SP-3080,1973.

(编辑:叶青、王碧珺)