

# 发动机反推运动机构可靠性优化设计研究



常琦<sup>1</sup>, 胡颖石<sup>1</sup>, 周长聪<sup>1</sup>, 何宝明<sup>2</sup>, 冯奥博<sup>1</sup>, 王元生<sup>1</sup>

1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072

2. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241

**摘要:**反推装置作为现代民用飞机必不可少的减速系统,承担着飞机降落的重要任务,对飞机的安全飞行至关重要。根据叶栅式反推装置构型及其工作原理,本文建立了反推机构运动学理论模型。通过机构运动学仿真,验证了所建立模型的合理性与正确性。将阻流门在整个偏转过程中的最大角加速度作为优化目标,各部件满足几何运动关系作为约束条件,建立反推运动机构的确定性优化模型。与此同时,考虑反推运动机构的两种失效模式,将可靠性考虑到优化设计中,建立可靠性优化设计模型。在 Matlab 环境下对反推机构进行优化设计计算,结果表明,在满足可靠性约束的情况下,阻流门在整个运动过程中的角加速度得到了进一步的优化,且整个机构在运动中不出现干涉,整个反推力装置可以正常工作。本文建模流程与可靠性优化方法和结果可以为反推装置结构设计提供参考。

**关键词:**反推装置;阻流门;运动机构;可靠性;优化设计

中图分类号:V228.7+4

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.04.007

大型民航客机通常采用大涵道比涡扇发动机作为动力装置,飞机运载能力的提高以及发动机推力的增大,使得降落时滑跑距离及要求的跑道长度不断增大,尤其当跑道湿滑或结冰时,滑跑距离将会更长,影响飞机安全工作。为减小飞机降落时的滑跑距离,民航客机通常在发动机上配装反推装置,即在降落时通过该装置改变发动机喷气出口的气流方向,使发动机产生与航向相反的推力,有效地缩短着陆时的滑跑距离<sup>[1-4]</sup>。

反推装置主要包括遮挡气流的反推运动机构组件和驱动该套装置的液压作动系统。在现有民航客机上,叶栅式反推装置使用最广泛,其工作时,通过作动系统推动反推装置中的阻流门结构发生翻转,遮挡发动机外涵道中的气流使其发生逆转并从叶栅中喷出,进而产生反向推力<sup>[5-7]</sup>。

反推装置的运动组件是叶栅式反推装置的执行机构,其各部件的运动学特性直接影响反推系统的正常开启与关闭,对其进行运动学分析,研究各部件的运动学特性是反推装置结构设计、参数优化的重要基础。

研究者们针对反推装置及其作动系统开展研究。O'Brien<sup>[8]</sup>分析了波音 777 客机反推装置液压作动系统,该作动系统由 6 个液压作动筒驱动两个整流罩进行平移运动,指出了致使液压作动系统发生“卡死”的驱动力差异和安装位置不匹配等因素。Strash 等<sup>[9]</sup>研究了反推装置的气动性能,计算了反推装置在地面效应下的排气流动轨迹并分析了其流动特征。Butterfield 等<sup>[10]</sup>研究了反推装置的叶栅设计,针对三种不同的设计,计算了达到结构相关性时的叶栅最小重量(质量)。Rajput 等<sup>[11]</sup>对无阻流门反推装置进行了参数化计算研究,建立了模拟试验装置的数值模型。Williams 等<sup>[12]</sup>研究了反推装置在工作过程中的风扇的气动性能。

近年来,结合大型客机与配套的大涵道比涡扇发动机研发,国内也对反推装置开展了相关研究。主要集中在气流场分析<sup>[13-14]</sup>、反推装置气动性能研究<sup>[15-17]</sup>、反推装置液压作动系统设计<sup>[18]</sup>、叶栅式反推装置的受载与传力<sup>[19]</sup>、反推装置试验加载系统设计<sup>[20]</sup>、发动机反推系统安全性设

收稿日期: 2023-10-03; 退修日期: 2024-01-04; 录用日期: 2024-02-01

基金项目: 航空科学基金(2020Z009053003); 西北工业大学博士论文创新基金(CX2022012)

引用格式: Chang Qi, Hu Yingshi, Zhou Changcong, et al. Research on reliability optimization design of engine reverse thrust mechanism[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(04): 52-59. 常琦, 胡颖石, 周长聪, 等. 发动机反推运动机构可靠性优化设计研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(04): 52-59.

计<sup>[21-22]</sup>等方面。张少军等<sup>[19]</sup>利用多体动力学软件建立了反推装置动力学模型,并基于载荷移置的方法将阻流门上的分布载荷等效处理成节点集中力载荷,分析了反推装置关键零件的载荷特性。陈永琴等<sup>[18]</sup>建立了液压作动系统中各部件及整个系统的数学模型和AMESim模型,分析了液压作动筒的位移、受力及同步性规律。叶栅式反推装置虽然在飞机上应用广泛,然而关于反推装置运动学与动力学分析、反推装置结构优化及部件参数对反推系统性能影响的理论研究较少。

本文以叶栅式反推装置为研究对象,在对反推机构进行运动学分析的基础上,建立其运动学理论计算模型。然后针对反推运动机构设计中所关注的输出性能,建立其确定性优化设计和可靠性优化设计(RBDO)两种模型,并开展优化设计。

## 1 反推机构运动学分析

图 1(a)为某型航空发动机反推装置简图,完整反推装置由两个对称的 C 形单半反推机构组成<sup>[23-24]</sup>。如图 1(b)所示,单半反推机构航向前端装有 5 个阻流门。每个阻流门前端通过关节轴承与移动外罩连接,后端装有弹簧片并和阻流门拉杆通过关节轴承连接,拉杆另一端则通过关节轴承与核心机外罩连接。

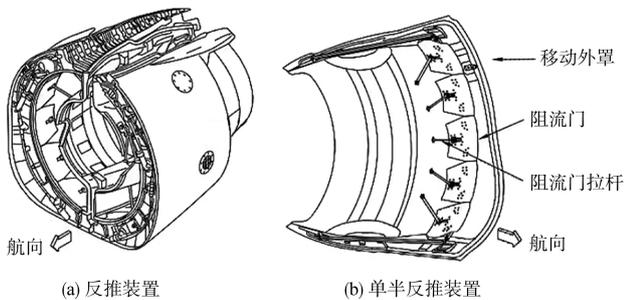


图 1 反推装置简图

Fig.1 Sketch of the thrust reverse device

当飞机巡航时,阻流门处于收起状态,如图 2(a)所示,气流通过前端风扇进入外涵道,最终在发动机尾部快速流出,从而给飞机提供航向推力。在飞机降落着陆时,飞机需要减速,此时移动外罩沿逆航向移动,带动阻流门向下偏转,如图 2(b)所示,阻流门将沿逆航向流动的气流折返,使其沿顺航向 45°流出,进而产生逆航向反推力,最终达到使飞机减速的目的。

该型反推机构阻流门的运动过程分为平移运动阶段和

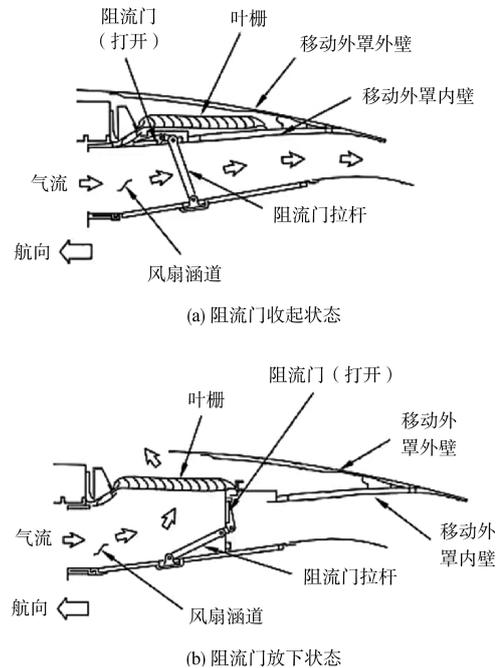


图 2 反推装置阻流门收起和放下示意图

Fig.2 Sketch for illustrating the stow and deploy position of the thrust reverser mechanism

偏转运动阶段两个部分,图 3 给出了该反推机构的运动学简图。在平移运动阶段,阻流门依靠弹簧片的变形维持水平运动状态,从而使得阻流门下放角维持在 0°,因此可以将该阶段简化成图 3(a)所示的运动过程。其中, $a$ 为阻流门的等效长度,即阻流门与弹簧片的连接点到阻流门前缘的距离; $b$ 为阻流门拉杆长度; $x$ 为移动外罩的水平移动距离, $l$ 为阻流门拉杆下支点到阻流门水平运动直线的垂直距离, $x_0$ 为初始状态下阻流门拉杆下支点到阻流门前缘的水平距离。以上设计变量的数据均可根据设计文件得到,或者根据初始三维模型测量得到。该运动简图通过两个平移副的铰接代替弹簧片的变形,从而在保证阻流门水平运动的前提下简化了运动模型。

在偏转运动阶段,弹簧片恢复原长且不再变形,阻流门开始偏转,此时阻流门拉杆长度是不变的,因此可以将该阶段简化成如图 3(c)所示的运动过程。其中, $\varphi$ 为阻流门偏转角度。由弹性运动阶段与刚性运动阶段的运动简化模型可以看出,由弹性运动阶段转为刚性运动阶段的转换点应在图 3(b)所示位置,此时有式(1)成立

$$(x + a - x_0)^2 + l^2 = b^2 \quad (1)$$

根据以上分析可以建立阻流门偏转角度 $\varphi$ 随移动外罩移动距离 $x$ 的关系式(2)

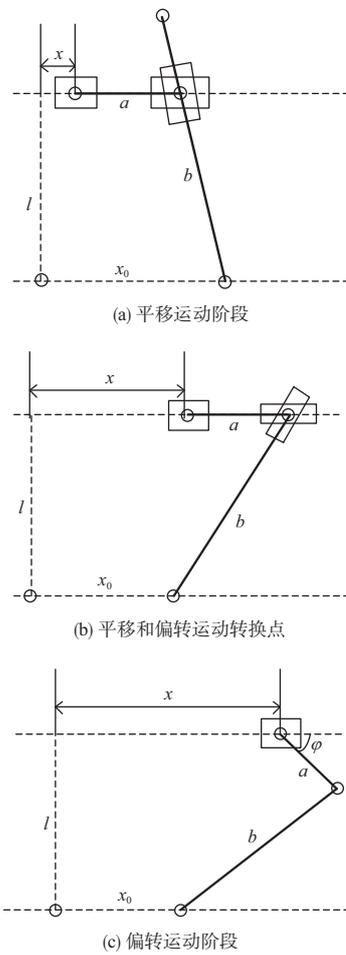


图3 反推机构阻流门运动学简图

Fig.3 Kinematics diagram of the blocker door of thrust reverser mechanism

$$\varphi = \begin{cases} 0, & b^2 \geq l^2 + (x + a - x_0)^2 \\ \arccos\left(\frac{x_0 - x}{c}\right) - \arccos\left(\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}\right), & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $c = \sqrt{l^2 + (x_0 - x)^2}$ 。

根据相关实际测得的数据,取  $a = 237\text{mm}$ ,  $b = 420\text{mm}$ ,  $l = 415\text{mm}$ ,  $x_0 = 260\text{mm}$ ,  $x \in [0, 550.7]\text{mm}$ 。为了说明式(2)所示理论模型的正确性,图4分别给出了用式(2)与Adams运动学仿真分析得到的偏转角度  $\varphi$  随外罩移动距离  $x$  的关系曲线图。

由图4可以看出,两条曲线几乎吻合。同时,可以看出Adams仿真模型中,其阻流门开始偏转的平移距离相较于理论模型更早,其原因在于理论模型中,假设了弹簧片在恢复原长之后阻流门才开始下放,而仿真模型中在弹簧片恢复原长之前阻流门就已经开始偏转,这一结果与实际测得结果相符。因此采用式(2)所示的理论模型来代替仿真模

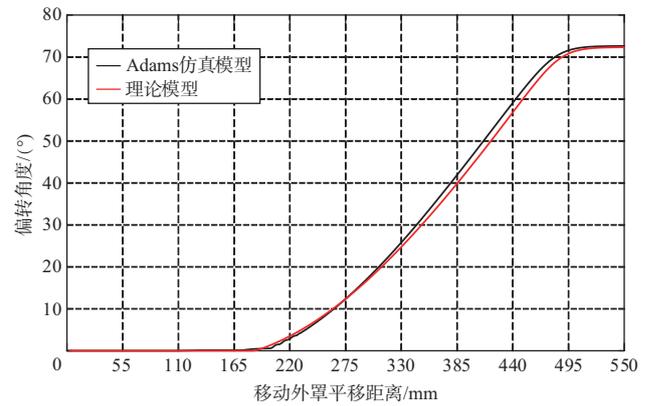


图4 阻流门偏转角随时间变化曲线

Fig.4 Curve of the deflection angle of the choke valve over time

型进行阻流门偏转角度的分析是合理的。

## 2 反推机构可靠性优化设计研究

基于反推机构运动学分析及其阻流门偏转角度随移动外罩平移距离的函数推导,本节进行反推机构可靠性优化设计模型的建立和分析计算。首先在反推机构确定性优化设计模型的基础上,建立可靠性优化设计模型。然后对可靠性优化设计计算方法进行介绍,最后对反推机构进行可靠性优化设计计算和分析。

### 2.1 确定性优化设计模型

为了保证阻流门在整个偏转过程中尽可能的平稳,可将阻流门偏转的最大角加速度作为优化目标。为了求得阻流门最大角加速度的理论模型,应给出阻流门偏转角度随时间变化的关系。其可以根据作动筒的作动速度随时间的变化关系给出,如式(3)所示

$$v(t) = \begin{cases} \frac{363}{1 + e^{-23.5t + 5.5}}, & t < 1 \\ 363 - \frac{363}{1 + e^{-23.5t + 41.16}}, & 1 < t < 2 \end{cases} \quad (3)$$

由函数可知,在1s时作动筒达到最大速度363mm/s。通过对速度的积分,可以得到移动距离随时间的关系,即

$$x(t) = \int_0^t v(t) dt \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)即可得到阻流门偏转角度随时间变化的关系  $\varphi(t)$ 。通过对  $\varphi(t)$  求一阶导数和二阶导数即可得到阻流门在整个运动过程中的偏转角速度以及偏转角加速度,即

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (5)$$

$$\alpha(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} \quad (6)$$

得到阻流门在整个运动过程的角速度和角加速度后,即可确定目标函数为  $\max|\alpha(t)|$ 。在得到目标函数后,应确定设计变量。如图5和图6所示,对于该反推机构,影响目标函数的因素有  $a, b, l, x_0$ , 其中  $x_0$  表示连杆在核心机舱上的连接位置。而核心机舱的直径是随航向坐标  $X$  的改变而改变,因此  $l$  应是一个与  $x_0$  相关的函数,即

$$l = l_1 - r(x_0) \quad (7)$$

式中,  $l_1$  为阻流门水平运动直线到轴心的距离,可由图5测得  $l_1=1035\text{mm}$ ,  $r(x_0)$  表示在  $X = x_0$  处的核心机舱半径,如图6所示,可由曲线拟合的方法得到其近似表达式。

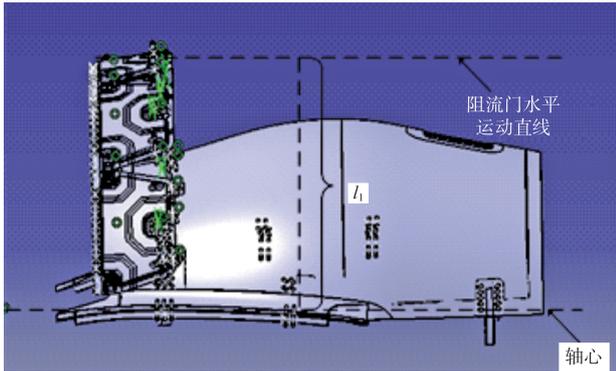


图5 阻流门水平运动直线到轴心的距离示意图

Fig.5 Illustration diagram of the distance from the movement direction of the blocker door to the axis

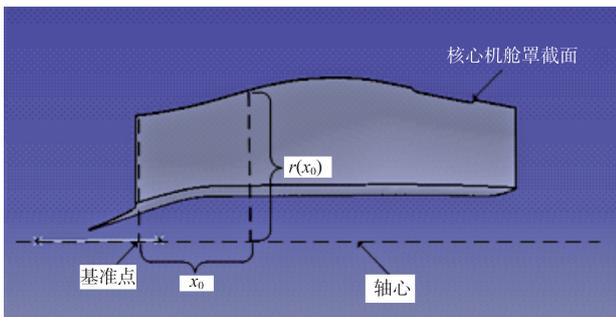


图6 核心机舱半径  $r(x_0)$  示意图

Fig.6 Illustration diagram of core cabin radius

最终,确定设计变量为  $a, b, x_0$ 。为了使该机构在可以保证反推效果,应使其最终下放角度不小于  $70^\circ$ ,同时考虑各个变量的边界条件,给出该反推机构的确定性优化模型应为

$$\begin{aligned} & \min \max |\alpha(t)| \\ & \text{s.t. } \varphi(2) \geq 70^\circ \\ & \quad b^2 \geq l^2 + (x_0 - a)^2 \\ & \quad 0 \leq a \leq 300\text{mm} \\ & \quad b \geq 0, x_0 \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $\varphi(2)$  表示阻流门在最终放下时刻的下放角度,  $b^2 \geq l^2 + (x_0 - a)^2$  表示运动几何关系约束条件。

## 2.2 可靠性优化设计模型

2.1节通过对影响阻流门作动的因素的分析,得到了如式(8)所示的确定性优化模型,然而该模型并未考虑不确定性因素对阻流门作动的影响,因此本节将充分考虑不确定性因素,建立反推机构运动学可靠性优化设计RBDO模型。

考虑  $a, b, x_0$  的不确定性,服从正态分布,均值分别为  $\mu_a, \mu_b$  和  $\mu_{x_0}$ , 对应的变异系数均为 0.001, 则式(8)所示的确定性优化模型可以改写成如式(9)所示的RBDO模型

$$\begin{aligned} & \min \max |\alpha(t)| \\ & \text{s.t. } \Pr(70^\circ - \varphi(2) \leq 0) \leq P_{f1}^* \\ & \quad \Pr(b^2 - l^2 - (x_0 - a)^2 \leq 0) \leq P_{f2}^* \\ & \quad 0 \leq \mu_a \leq 300\text{mm} \\ & \quad \mu_b \geq 0, \mu_{x_0} \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $\Pr(\cdot)$  表示概率算子,  $P_{f1}^*$  和  $P_{f2}^*$  分别为第一个失效概率约束和第二个失效概率约束,且取  $P_{f1}^* = P_{f2}^* = 10^{-4}$ 。需要说明的是,第一失效概率关注的是阻流门最终定位角度是否满足设计要求,第二失效概率关注的是阻流门在整个运动过程中偏转角度是否满足设计要求。

## 2.3 可靠性优化设计方法

由于RBDO问题存在外层优化和内层可靠性分析的耦合,计算成本较高。目前的主流方法是在可靠性分析中重新构造优化问题,分为双层法和单层法<sup>[25]</sup>。其中双层方法是解决RBDO问题的最直接方法,它由两个嵌套循环组成:外层循环在设计空间内寻找最优结果,内层循环进行可靠性分析。由于设计变量的取值随着迭代次数而变化,使得计算成本很高,可以采用解耦技术降低成本。解耦方法通过一系列确定性优化和可靠性分析来解决RBDO问题。本节主要介绍基于迭代算法的单层法(ISLP),并将所得到的结果与目前较为成熟的完全单层法(CSLP)、自适应单层法(ASLP)和增强单层法(ESLP)进行对比<sup>[26-27]</sup>。

图7给出了单层法迭代算法的流程。首先,指定目标函数的初始设计  $d^{(0)}, \mu_x^{(0)}, \mu_p$ , 随机变量和参数的标准差  $\sigma_x, \sigma_p$ ; 定义约束函数的初始点  $d^{(0)}, X^{*(0)}, P^{*(0)}$ , 令  $X^{*(0)} = \mu_x^{(0)}$ ,  $P^{*(0)} = \mu_p^{(0)}$ 。此时,第  $i$  个约束函数的初始归一化梯度矢量  $A_i$  和  $B_i$  为

$$\begin{aligned} A_i^{(0)} &= \frac{\sigma_x^* \nabla_x G_i(d^{(0)}, X^{*(0)}, P^{(0)})}{\|\sigma_x^* \nabla_x G_i(d^{(0)}, X^{*(0)}, P^{(0)})\|} \\ B_i^{(0)} &= \frac{\sigma_p^* \nabla_p G_i(d^{(0)}, X^{*(0)}, P^{(0)})}{\|\sigma_p^* \nabla_p G_i(d^{(0)}, X^{*(0)}, P^{(0)})\|} \end{aligned} \quad (10)$$

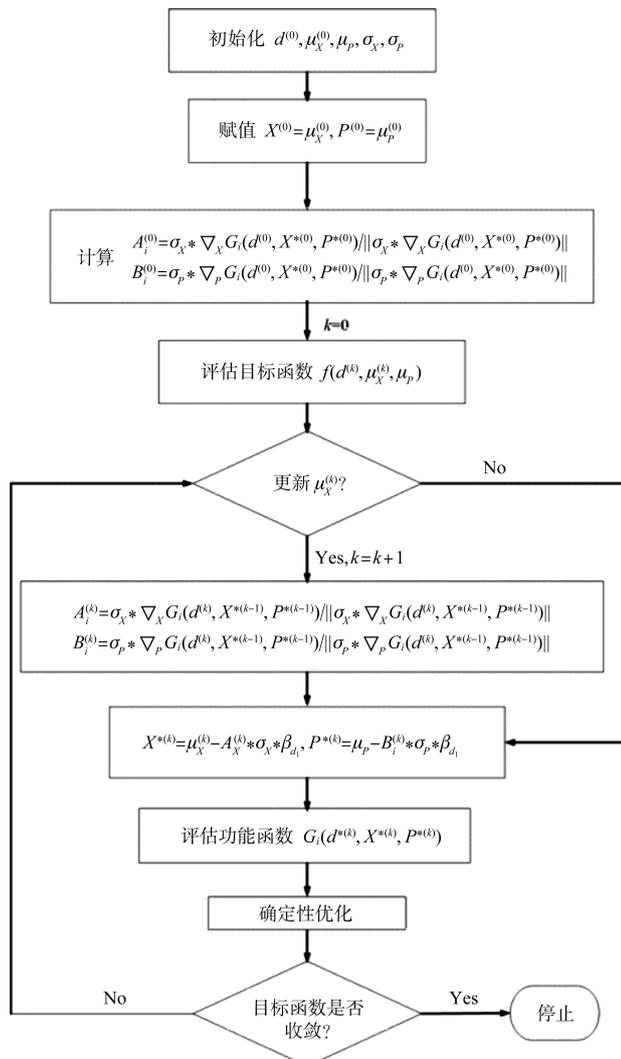


图7 迭代算法流程

Fig.7 Flowchart of the iterative algorithm

在确定性优化的第 $k$ 次迭代,目标函数在 $d^{(k)}, \mu_x^{(k)}, \mu_p$ 进行评估。同时,该算法检测是否在优化过程中更新了 $\mu_x^{(k)}$ ;如果没有更新,则使用目前的梯度矢量 $A_i^{(k)}$ 和 $B_i^{(k)}$ 计算当前设计点

$$\begin{aligned} X^{*(k)} &= \mu_x^{(k)} - A_i^{(k)} * \sigma_x * \beta_{d_i} \\ P^{*(k)} &= \mu_p - B_i^{(k)} * \sigma_p * \beta_{d_i} \end{aligned} \quad (11)$$

评估最终的约束函数,如果在本次迭代更新了 $\mu_x^{(k)}$ ,则利用归一化梯度矢量 $A_i^{(k)}$ 和 $B_i^{(k)}$ 计算约束函数所需的 $X^{(k)}$ 和 $P^{(k)}$ 之前,需要对梯度矢量 $A_i^{(k)}$ 和 $B_i^{(k)}$ 进行更新。这是保持设计 $\mu_x^{(k)}$ 与 $X^{*(k)}, P^{*(k)}$ 一致的关键步骤,因此,保证了算法的稳健性。该算法避免了不必要的梯度计算,大大提高了计算效率。

## 2.4 计算结果及分析

根据2.3节所介绍的单层RBDO分析方法,对2.2节所提出的反推机构运动学RBDO模型进行分析,与其余三种单层RBDO方法对比,可以得到表1的结果。其中 $f(x)$ 表示目标函数值, $N_{\text{call}}$ 表示调用功能函数的次数。

表1 4种单层法所得RBDO分析结果

Table 1 RBDO analysis results obtained from four single-layer methods

	$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$x_0/\text{mm}$	$f(x)/((^\circ)/\text{s}^2)$	$N_{\text{call}}/\text{次}$
ISLP	260	379.57	286.31	436.85	262
CSLP	260	379.57	286.31	436.85	994
ASLP	260	379.57	286.31	436.85	297
ESLP	260	379.57	286.31	436.85	193

由表1分析结果可知,用这4种单层法所得的分析结果一致,因此可以认为该RBDO的优化结果为 $a = 260\text{mm}$ ,  $b = 379.57\text{mm}$ ,  $x_0 = 286.31\text{mm}$ 。同时在这4种方法中,ESLP方法调用功能函数的次数最少,效率最高,因此对于该算例而言,ESLP方法具有更好的适应性。为了说明RBDO优化后的结果参数与初始参数以及确定性优化后的参数区别,表2给出了RBDO结果与确定性优化结果的对比。

表2 确定性优化和RBDO分析结果对比

Table 2 Comparison of deterministic optimization and RBDO analysis results

	$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$x_0/\text{mm}$	$f(x)/((^\circ)/\text{s}^2)$	$N_{\text{call}}/\text{次}$
可靠性优化	260	379.57	286.31	436.85	193
确定性优化	260	376.50	295.01	435.95	141
优化前	247	444.00	230.00	451.12	—

由表2可以看出,经过确定性优化与可靠性优化后,目标函数较优化前都有所下降,同时确定性优化较可靠性优化其目标函数下降的更多,原因就在于可靠性优化充分考虑了不确定性因素的影响,因此在设计上会比确定性优化设计所得结果更为保守。同时根据两种优化结果计算量的对比,可以看出可靠性优化的计算量相较于确定性优化的计算量高36.9%。在工程实际应用中采用可靠性优化设计可以保证结构机构在满足一定的可靠性要求的前提下,得到更优的目标结果。

为了更为直观地表示优化前后的区别,图8和图9分别给出了优化前与优化后的下放角度随时间变化曲线以及下放角加速度随时间变化曲线。由图8和图9可以看出,

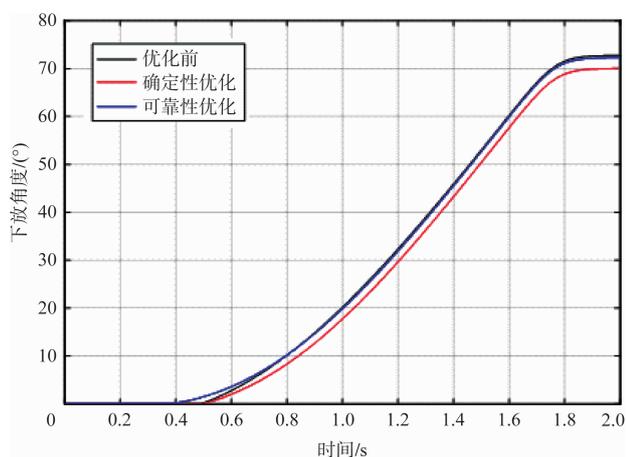


图8 优化前与优化后下放角度随时间变化对比

Fig.8 Comparison between the deflection angle over time and after optimization

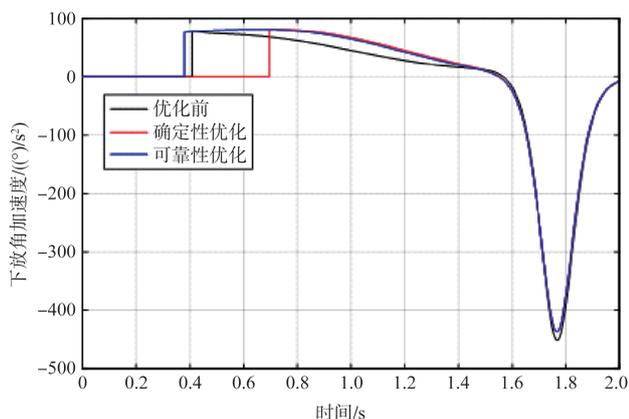


图9 优化前与优化后下放角加速度随时间变化对比

Fig.9 Comparison between angular acceleration before and after optimization

经过优化后,其阻流门相较于优化前提前开始下放,同时在运动到1.6~1.8s时,阻流门的下放角加速度达到最大值,通过优化分析后,可以将最大角加速度从 $451.12(^{\circ})/s^2$ 优化至 $436.85(^{\circ})/s^2$ ,从而使得该阻流门在整个运动过程中更加平稳。

### 3 结论

本文分析了典型的叶栅式反推装置结构特点及工作原理,在此基础上根据机构运动原理对反推装置简化并建立其运动学数学模型,以移动外罩位移为输入进行运动学仿真,仿真结果与理论数学模型基本符合。分别建立了确定性优化设计模型和可靠性优化设计模型,采用单层可靠性优化设计计算方法进行优化,由优化前后阻流门角加速度

对比曲线可知,优化后的最大角加速度从 $451.12(^{\circ})/s^2$ 降低至 $436.85(^{\circ})/s^2$ 。同时,在尺寸约束和可靠性约束下的移动外罩和阻流门上各特征点之间并未发生干涉,可以保证反推力装置正常实现展开/收回,同时阻流门运动满足可靠性设计要求。所建立可靠性优化设计流程可以为反推机构运动学优化设计提供指导。

AST

### 参考文献

- [1] Yetter J A. Why do airlines want and use thrust reverser[R]. NASA TM95-109158, 1995.
- [2] 王晨臣, 潘俊, 王洋洋. 飞机发动机短舱泄压过程研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(4): 29-34.  
Wang Chenchen, Pan Jun, Wang Yangyang. Research on pressure relief process in aircraft engine nacelle[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(4): 29-34. (in Chinese)
- [3] 孟祥喆, 郑浩, 赵志俊. 发动机进排气对某型靶机气动特性影响研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(7): 29-35.  
Meng Xiangzhe, Zheng Hao, Zhao Zhijun. Study on influence of engine intaking and exhausting on aerodynamic characteristics of a target drone[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(7): 29-35. (in Chinese)
- [4] McKay B, Barlow A. The ultra fan engine and aircraft based thrust reversing[C]. AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2012.
- [5] Colley R H, Sutton J M D. Thrust reverser for civil STOL aircraft[R]. SAE technical Paper 730358, 1973.
- [6] Mahmood T, Jackson A, Rizvi S H, et al. Thrust reverser for a mixed exhaust high bypass ratio turbofan engine and its effect on aircraft and engine performance[J]. American Society of Mechanical Engineers, 2012, 17(6): 205-215.
- [7] 陈著, 单勇, 沈锡钢, 等. 着陆滑跑状态下的反推力装置重吸入特性数值模拟[J]. 航空动力学报, 2016, 31(3): 733-739.  
Chen Zhu, Shan Yong, Shen Xigang, et al. Numerical simulation on re-ingestion characteristics under landing state for thrust reverser[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(3): 733-739. (in Chinese)
- [8] O'Brien M. Boeing 777 thrust reverser actuation system[J]. Aircraft Engineer and Aerospace Technology, 1998, 70(5): 364-366.
- [9] Strash D J, Summa J M, Frank J H, et al. Aerodynamic

- analysis of an installed thrust reverser[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16(1):10-15.
- [10] Butterfield J, Yao H, Price M, et al. Enhancement of thrust reverser cascade performance using aerodynamic and structural integration[J]. *Aeronautical Journal*, 2004, 108(1090): 621-628.
- [11] Rajput P, Kalkhoran I. Optimization of Blockerless Engine Thrust Reverser[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2017, 33(1):213-226.
- [12] Williams T S, Hall C A. Reverse Thrust Aerodynamics of Variable Pitch Fans[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2019, 141(8):81-90.
- [13] 陈著, 单勇, 沈锡钢, 等. 叶栅式反推力装置开启过程的三维非稳态数值模拟与分析[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(9):2132-2138.  
Chen Zhu, Shan Yong, Shen Xigang, et al. Three-dimensional unsteady numerical simulation and analysis of deployment for cascade thrust reverser[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017,32(9):2132-2138. (in Chinese)
- [14] 王志强, 沈锡钢, 胡骏, 等. 反推气流对发动机进口流场影响的数值研究[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(4):918-926.  
Wang Zhiqiang, Shen Xigang, Hu Jun, et al. Numerical investigation on influence of reverser flow to engine inlet flow field[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016,31(4):918-926. (in Chinese)
- [15] 谢业平, 王强, 邵万仁, 等. 叶栅式反推力装置阻流门运动规律对气动性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(6):1297-1302.  
Xie Yeping, Wang Qiang, Shao Wanren, et al. Effect of kinetic mechanism of blocker doors on aerodynamic performance for a cascade thrust reverser[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(6):1297-1302. (in Chinese)
- [16] 王鹏, 崔玉超, 陈迎春, 等. 宽体客机反推格栅气动性能实验与数值模拟研究[J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(4):413-422.  
Wang Peng, Cui Yuchao, Chen Yingchun, et al. Experimental and numerical research on the aerodynamic performance of wide-body air-crafts thrust reverser cascade[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2019,53(4): 413-422. (in Chinese)
- [17] 王志强, 沈锡钢, 胡骏. 反推状态下大涵道比涡扇发动机气动稳定性预测与评估[J]. *航空学报*, 2017, 38(2):155-166.  
Wang Zhiqiang, Shen Xigang, Hu Jun. Prediction and evaluation of aerodynamic stability of high bypass ratio turbofan engine deployed with thrust reverser[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017,38(2):155-166. (in Chinese)
- [18] 陈永琴, 汪天兴, 苏三买, 等. 反推力装置液压作动系统 AMESim 建模与仿真[J]. *航空动力学报*, 2017(11):238-246.  
Chen Yongqin, Wang Tianxing, Su Sanmai, et al. Modeling and simulation of thrust reverser hydraulic actuation system based on AMESim[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017(11): 238-246. (in Chinese)
- [19] 张少军, 王汉平, 何江军, 等. 叶栅式反推力装置的受载与传力[J]. *四川兵工学报*, 2015(3):56-59.  
Zhang Shaojun, Wang Hanping, He Jiangjun, et al. Loading and force transmission of cascade reverse thrust device[J]. *Sichuan Qrdnance Journal*, 2015(3):56-59. (in Chinese)
- [20] 是贤珠. 某型飞机反推力装置加载试验[J]. *民用飞机设计与研究*, 2012(1):61-65.  
Shi Xianzhu. The loading test of the reserves thrust system[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2012(1): 61-65. (in Chinese)
- [21] 隋杰飞, 朱岩. 液压作动反推力装置安全性设计与研究[J]. *液压与气动*, 2016(1):104-107.  
Sui Jiefei, Zhu Yan. The safety design and research of hydraulic action thrust reverser[J]. *Chinese Hydraulics and Pneumatics*, 2016(1):104-107. (in Chinese)
- [22] 张艳慧, 秦浩, 王代军. 发动机反推力系统安全性设计[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(7):1784-1792.  
Zhang Yanhui, Qin Hao, Wang Daijun. Engine reverser thrust system safety design[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015,30(7):1784-1792.(in Chinese)
- [23] 李少龙, 黄南, 董红莉, 等. 航空发动机通用件设计体系建设思路研究[J]. *航空科学技术*, 2019,30(4):21-25.  
Li Shaolong, Huang Nan, Dong Hongli, et al. Research on construction proposals of aero-engine general parts design system[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2019, 30(4):21-25. (in Chinese)
- [24] 杨向群, 田杨涛, 王胜, 等. 航空发动机反推作动器卡滞故障分析[J]. *航空科学技术*, 2021,32(8):43-48.  
Yang Xiangqun, Tian Yangtao, Wang Sheng, et al. Analysis of jammed failure of aero-engine reverse actuator[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021,32(8):43-48. (in Chinese)

- [25] Tsompanakis Y, Lagaros N D, Papadrakakis M. Structural design optimization considering uncertainties: Structures & infrastructures book[M]. London: CRC Press, 2008.
- [26] Chen Xiaoguang, Hasselman T, Neill D. Reliability based structural design optimization for practical applications[C]. 38th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 1997.
- [27] Zhang Xudong, Huang Hongzhong, Xie Min. Single loop methods for reliability based design optimization[J]. Journal of University of Electronic Science & Technology of China, 2011, 40(1): 157-160.

## Research on Reliability Optimization Design of Engine Reverse Thrust Mechanism

Chang Qi<sup>1</sup>, Hu Yingshi<sup>1</sup>, Zhou Changcong<sup>1</sup>, He Baoming<sup>2</sup>, Feng Aobo<sup>1</sup>, Wang Yuansheng<sup>1</sup>

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China

**Abstract:** According to the configuration and working condition of thrust reverse mechanism, the theoretical model of kinematics of the thrust reverse mechanism is established. Through the kinematics simulation, the rationality and correctness of the established model are verified. Considering that the blocker door needs to be as stable as possible in the whole deflection process, the maximum angular acceleration of the blocker door in the whole deflection process is taken as the optimization goal of the thrust reverser mechanism, and each motion mechanism of the device meets the geometric relationship as the constraint condition, and the deterministic optimization model of the thrust reverser mechanism is established. At the same time, considering the two failure modes of the reverse mechanism, reliability is considered in the optimization design, and a reliability-based design optimization model is established. The optimal design calculation of the thrust reverser mechanism is carried out in Matlab. The results show that the angular acceleration of the blocker door in the whole movement process is further optimized under the condition of meeting the reliability constraints, and the whole mechanism does not interfere in the movement, and the whole thrust reverser device can work normally. The modeling process and reliability-based design optimization method in the paper can provide reference for the structural design of the thrust reverse mechanism.

**Key Words:** thrust reverse device; blocker door; mechanism; reliability; design optimization

**Received:** 2023-10-03; **Revised:** 2024-01-04; **Accepted:** 2024-02-01

**Foundation item:** Aeronautical Science Foundation of China (2020Z009053003); Innovation Foundation for Doctor Dissertation of Northwestern Polytechnical University (CX2022012)