

反推力装置结构优化设计

高昊浩¹, 陈永琴¹, 苏三买², 谢荣璋^{2,3}

- (1. 西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071;
2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;
3. 中国人民解放军第 5719 工厂, 成都 611937)

摘 要: 根据叶栅式反推力装置结构及其工作原理, 建立了反推力装置运动学与动力学数学模型, 以此为基础, 取反推力装置对作动系统的最大负载力极小化为目标函数, 装置各运动机构满足几何关系为约束条件, 建立反推力装置结构优化模型。通过反推力装置运动学及动力学仿真, 并分析在不同结构参数下反推力装置运动学及动力学特性, 验证了所建立模型的合理性与正确性。在 Matlab 环境下采用惩罚函数法对反推力装置进行结构优化设计, 结果表明: 优化后的反推力装置正向最大负载力下降了 24.5%, 负向最大负载力下降了 16.3%, 且各个机构运动不出现干涉, 整个反推力装置可正常工作。论文建模方法与优化结果可为反推力装置结构设计提供参考。

关 键 词: 反推力装置; 移动外罩; 阻流门; 运动学与动力学特性; 结构优化

中图分类号: V228.7

文献标志码: A

Structural optimization design of thrust reverser

GAO Wuhao¹, CHEN Yongqin¹, SU Sanmai², XIE Rongzhang^{2,3}

- (1. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. The 5719 Factory, People's Liberation Army, Chengdu 611937, China)

Abstract: According to the structure and working principle of the cascade thrust reverser, the kinematic and dynamic mathematical model of the thrust reverser was established. On this basis, the maximum load force of the thrust reverser on the actuating system was minimized as the objective function, and the geometric relationship of the moving parts was taken as the constraint condition, the structure optimization model of the thrust reverser was established. Through the kinematics and dynamics simulation of the thrust reverser, and the kinematics characteristics of the thrust reverser under different structural parameters, it was verified that the established model was reasonable and correct. Under the Matlab environment, the structure optimization of the thrust reverser was carried out by the penalty function method. Results showed that the optimized maximum load force of the thrust reverser in the positive direction decreased by 24.5%, and in the negative direction decreased by 16.3%, and the moving parts did not interfere, the whole thrust reverser can work normally. The modeling method and optimization results can provide reference for thrust reverser structural design.

收稿日期: 2021-06-05

作者简介: 高昊浩(1995—), 男, 硕士生, 主要从事机械结构设计与动力学仿真方面的研究。

引用格式: 高昊浩, 陈永琴, 苏三买, 等. 反推力装置结构优化设计[J]. 航空动力学报, 2022, 37(8): 1724-1731. GAO Wuhao, CHEN Yongqin, SU Sanmai, et al. Structural optimization design of thrust reverser[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(8): 1724-1731.

Key words: thrust reverser; translating sleeve; blocker door; kinematics and dynamics characteristics; structural optimization

大型民航客机与运输机通常采用大涵道比涡扇发动机作为动力装置,随着发动机涵道比与推质比增大,飞机运载能力提高,使得飞机在降落时滑跑距离不断增大,尤其当跑道湿滑或结冰时,滑跑距离将会更长。为降低飞机在机场降落时的滑跑距离,提高飞机的飞行安全,发动机通常配装有反推力装置^[1-4]。

当前,大型民航客机与运输机普遍采用叶栅式反推力装置,其核心是通过液压作动系统驱动安装在发动机外涵道的移动外罩,并带动阻流门翻转,使发动机外涵道中的气流发生逆转并从叶栅中喷出,进而产生阻止飞机向前滑行的反向推力^[5-7]。

结构设计是反推力装置设计的重要内容。结构参数合理与否直接影响反推力系统的性能及工作安全,良好的结构设计可提高反推力系统的效率,降低反推力作动系统的驱动负载;结构设计不合理,轻则使作动系统的驱动负载增加,严重时将出现机构卡死而影响飞机的飞行安全^[8-10]。

现有关于叶栅式反推力装置的文献主要集中在反推力装置气动性能研究^[11-13]、反推力装置运动学与动力学分析^[14-16]、反推力装置试验加载系统设计^[17-18]、反推力系统安全性设计^[19]等方面,其中文献[14]基于软件 ADAMS 分析了反推力装置主要部件受力变化,文献[15]建立了反推力装置运动学与动力学数学模型,并对不同结构参数下的反推力装置运动学及动力学仿真。上述文献侧重研究的是确定结构下的反推力装置气动性能、承载与受力、运动学与动力学,而对反推力装置结构参数如何选取,也即对反推力装置结构优化设计研究甚少。

本文以叶栅式反推力装置为研究对象,在分析其运动学及动力学模型的基础上,建立反推力装置结构优化数学模型,进而对反推力装置主要结构参数优化设计。

1 叶栅式反推力装置结构及工作原理

叶栅式反推力装置通常安装在机翼下的发动机短舱中部,由如图 1 所示的两个相同半部组成,其中每个半部在结构上包括移动外罩、叶栅、液压作动筒、阻流门、阻流门拉杆等部件。

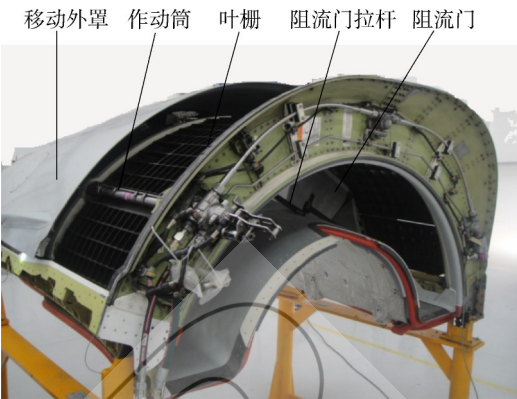


图1 叶栅式反推力装置结构实物图(半部)
Fig.1 Physical diagram of the cascade thrust reverser (half part)

叶栅式反推力装置工作原理示意图如图 2 所示。飞机在空中飞行过程中,反推力装置始终处于关闭状态,此时阻流门 6 遮挡住叶栅 3 的气流通道,气流 9 从发动机外涵道的喷管喷出,产生正向推力。当飞机降落时,反推力装置打开,其机构在展开过程中的运动为:液压作动筒 4 在高压油的作用下伸展,驱使移动外罩 5 向后平移,阻流门 6 一端与移动外罩铰接,另一端与阻流门拉杆 7 铰接,并随着移动外罩 5 的平动作平动,同时在阻流门拉杆 7 的作用下转动。阻流门拉杆则在阻流门 6 的作用下绕 Q 点转动。随着移动外罩 5 的推移,叶栅 3 逐渐露出,气流 9 则一部分从叶栅中流出,另一部分从发动机外涵道流出。当移动外罩移动到最大位置时,阻流门 6 完全遮挡住发动机外涵

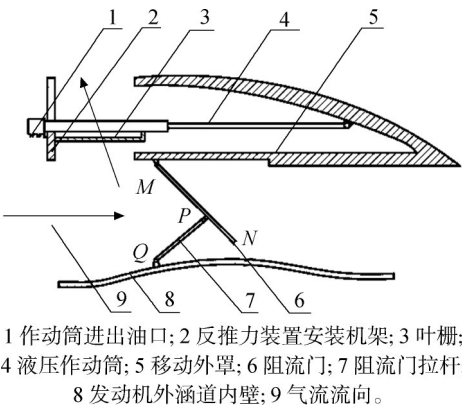


图2 叶栅式反推力装置工作原理示意图
Fig.2 Working principle schematic diagram of the cascade thrust reverser

道,此时发动机外涵道的气流全部从叶栅3中流出并产生反向推力。

2 反推力装置结构优化数学模型

反推力装置运动组件是叶栅式反推力装置的执行机构,对其进行运动学与动力学建模是叶栅式反推力装置结构设计与参数优化的基础。本节首先建立反推力装置运动学与动力学模型,然后以负载力为目标,机构运动不出现干涉为约束条件,建立反推力装置结构优化数学模型。

2.1 反推力装置运动学及动力学模型

叶栅式反推装置分为对称的两个半部,分别通过预设的吊点与飞机的机翼相连,由于结构具有对称性且两个半部具有相似的运动学与动力学特性,因此选取其中一个半部作为研究对象。

现有的叶栅式反推力装置,在其每一个半部中沿周向有2~3组运动特性一致的运动组件,故本文选取其中一组进行研究。以图2中Q点为坐标原点,平行于发动机进气气流方向且过Q点的方向为x轴,在阻流门拉杆转动平面上,过Q点且与x轴垂直的方向为y轴。在该坐标系下,根据反推力装置各部件运动特征,建立图2机构简化的数学模型,其中机构封闭矢量方程为^[15]

$$le^{i\theta} + me^{i\varphi} = r_M + h \quad (1)$$

式中 l 、 m 分别为阻流门拉杆PQ段和阻流门MP段的长度, h 为外涵道内壁与移动外罩之间的距离, r_M 为M点位移在x轴方向上的分量, θ 和 φ 分别为阻流门拉杆和阻流门与x轴正向的夹角, i 为虚数单位。

对式(1)求导可得机构速度方程并写为矩阵形式

$$l\omega_1 ie^{i\theta} + m\omega_2 ie^{i\varphi} = v_M \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} l\sin\theta & m\sin\varphi \\ l\cos\theta & m\cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_M \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 ω_1 为阻流门拉杆角速度, ω_2 为阻流门角速度, v_M 为移动外罩M点的速度。

根据上述反推力装置结构原理分析,将移动外罩简化为移动滑块,并对反推力装置各部件受力分析,其机构受力简图如图3所示,图中参数 m 、 h 、 l 表示机构对应部分的长度如式(1)后说明, n 为阻流门PN段的长度。

图3中,移动外罩主要受液压作动筒推力 F_T 、滑轨的摩擦力 f 以及与阻流门铰接处x、y轴方向上的作用力 F'_{Mx} (等价于反推力装置对作动系统

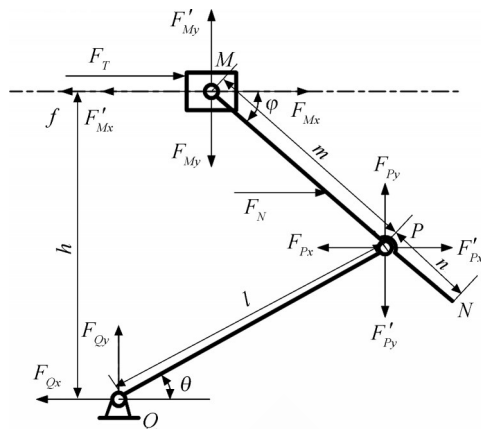


图3 反推力装置受力简图

Fig.3 Force diagram of the thrust reverser

的负载力 F)和 F'_{My} 。阻流门主要受与移动外罩和阻流门拉杆两个铰接处x、y轴方向上的作用力 F_{Mx} 、 F_{My} 与 F_{Px} 、 F_{Py} ,以及发动机外涵道气流作用产生的气动载荷力 F_N 。阻流门拉杆受与阻流门和外涵道铰接处的x、y轴方向上作用力 F'_{Px} 、 F'_{Py} 、 F'_{Qx} 、 F'_{Qy} 以及气动载荷。

以阻流门为分析对象,建立力平衡方程如下:

$$\begin{cases} F_{Mx} + F_N - F_{Px} = 0 \\ F_{My} - F_{Py} = 0 \\ F_{Mx}m\sin\varphi - F_{My}m\cos\varphi + F_N\frac{m-n}{2}\sin\varphi = 0 \end{cases} \quad (4)$$

以阻流门拉杆为分析对象,由于阻流门拉杆呈细长杆,拉杆前后承受的气动压差非常小,因此所受气动载荷可以忽略不计。建立力平衡方程如下:

$$\begin{cases} F_{Qx} - F'_{Px} = 0 \\ F_{Qy} - F'_{Py} = 0 \\ F'_{Py}l\cos\theta - F'_{Px}l\sin\theta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

联立式(4)和式(5)可计算出反推力装置的对作动系统的负载力

$$F = \frac{F_N(2m\tan\theta\cos\varphi - m\sin\varphi + n\sin\varphi)}{2m(\sin\varphi - \tan\theta\cos\varphi)} \quad (6)$$

由于气动载荷 F_N 与发动机外涵道内气体流量和阻流门承压面积大小有关,即与外涵道间距 h 和阻流门的尺寸大小有关,所以当确定各部件结构长度参数 m 、 n 、 h 后,即可通过发动机出口流场计算得到气动载荷 F_N ^[15]。

当给定反推力装置的结构尺寸时,可由上述各式计算得到反推力装置各部件在任意时刻的运动学及动力学特性。这为反推力装置结构优化建模提供了基础。

2.2 反推力装置结构优化数学模型

由上述运动学与动力学分析可知,反推力装置在运动过程中,负载力的大小随作动筒的位置及各结构组件尺寸大小有关,该力的大小是作动系统设计的重要依据,负载力越小,对作动筒的负载越小,同时也降低了作动系统的功率损耗。所以取反推力装置负载力 F 的最大值 $F_{\max}$ 作为优化模型的目标函数。

对反推力装置进行结构设计时,除了要满足飞机发动机的气动性能外,还必须得保证机构的正常运动。基于反推力装置的结构特点及工作原理,分析反推力装置的展开过程,其工作过程动态变化示意图如图4所示,依次由未展开状态到展开过程中,最后是完全展开状态,其中 $\varphi_{\max}$ 为阻流门与移动外罩夹角 φ 的最大值,而 $\theta_{\min}$ 为阻流门拉杆与外涵道内壁水平方向夹角 θ 的最小值。

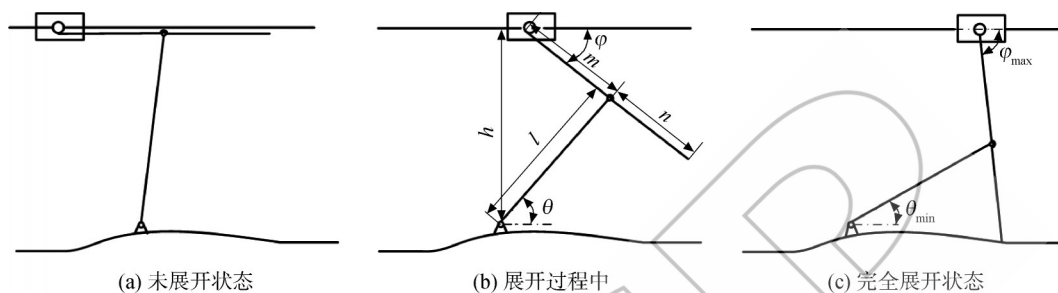


图4 反推力装置工作过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of the working process of thrust reverser

由图4可知,在反推力装置未展开状态下,阻流门拉杆的长度 l 需要大于或者等于外涵道间距 h 才能保证阻流门贴近移动外罩内壁(以满足发动机气动性能)。在展开过程中,阻流门的长度在 y 轴方向上的投影长度应满足始终小于外涵道间距,即满足如下尺寸约束条件:

$$\begin{cases} (m+n)\sin\varphi \leq h \\ l \geq h \end{cases} \quad (7)$$

若阻流门的长度小于外涵道间距,则随着移动外罩的滑移(若行程足够长),阻流门会绕 M 点一直转动直至与阻流门拉杆发生干涉。由前述运动学分析可知,阻流门上任一点在 y 轴方向上的位移都不能大于移动外罩的位移(等于外涵道间距),否则阻流门从开始运动就与移动外罩发生干涉,即满足如下不干涉条件:

$$\begin{cases} l\sin\theta \leq h \\ m+n \geq h \end{cases} \quad (8)$$

在反推力装置展开过程中,阻流门拉杆 PQ 以及阻流门 MP 段长度在 y 轴方向上的投影长度和应始终等于外涵道间距 h ,即满足如下约束条件:

$$l\sin\theta + m\sin\varphi = h \quad (9)$$

反推力装置负载力 F 在装置运动过程中是不断变化的,由文献[15]可知,最大负载力 $F_{\max}$ 出现在图4反推力装置完全展开状态,即阻流门完全遮挡的位置,即 $\varphi_{\max}(\theta_{\min})$ 处。由文献[16]可知,阻流门所受气动载荷 F_N 在数值上等于阻流门前后

面所受气动压差 Δp 和承压面积 S 的乘积,在阻流门开始转动一定角度后,气动压差基本保持不变。 Δp 可通过发动机外涵道流场基于CFD(计算流体力学)技术得到^[11],其值与外涵道的间距 h 、阻流门的承压面积以及叶栅通道露出面积相关,而在负载力最大时,即阻流门完全遮挡住外涵道,阻流门承压面积等于外涵道通道面积(与 h 成正相关,即大小不变),即 Δp 在负载力最大时也为常量,本文参考文献[11],选取气动压差的最大值作为输入。

综上,气动载荷 F_N 在负载力最大时其值也为固定值,其表达式可表示为

$$F_N = \Delta p(m+n)\sin\varphi_{\max} = \Delta p \cdot h \quad (10)$$

联立式(6)、式(9)以及式(10)可以得到 $F_{\max}$ 的一般表达式

$$F_{\max} = F(l, m, n, \varphi_{\max}, \theta_{\min}) \quad (11)$$

综上,以式(11)反推力装置负载力 F 的最大值 $F_{\max}$ 极小化作为目标函数,以式(7)~式(9)的等式与不等式条件作为约束条件,建立反推力装置结构优化数学模型如下:

目标函数

$$\min F_{\max} \quad (12)$$

约束条件

$$l\sin\theta_{\min} \leq h \leq l \quad (13)$$

$$h \leq m+n \leq h/\sin\varphi_{\max} \quad (14)$$

$$l\sin\theta_{\min} + m\sin\varphi_{\max} - h = 0 \quad (15)$$

$$l_{\min} \leq l \leq l_{\max} \quad (16)$$

$$m_{\min} \leq m \leq m_{\max} \quad (17)$$

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \quad (18)$$

式(13)与式(14)为各部件之间不干涉时须满足的不等式约束条件,式(15)为各部件结构尺寸之间须满足的等式约束关系,式(16)~式(18)为反推力装置各部件结构尺寸在设计状态下的约束范围。

3 反推力装置仿真及结构优化分析

运动学和动力学模型是结构优化模型的基础,本节首先进行运动学和动力学的仿真,以验证运动学和动力学模型的准确性。然后对反推力装置不同结构参数下的部件运动轨迹仿真,展示进行结构优化设计的重要意义与价值。最后在 Matlab 软件下采用惩罚函数法进行反推力装置结构优化计算。

3.1 反推力装置运动学及动力学特征仿真

以某叶栅式反推力装置为研究对象,主要部件的结构尺寸 l, h, m, n 分别为 210、208、155、53 mm。参考文献[11],选择移动外罩的运动规律如图 5 所示,其中移动外罩在展开阶段开始作加速运动,到 0.1 s 速度达到 0.38 m/s,然后作匀速直线运动,直至 0.9 s 左右逐渐减速为 0 m/s,在 1 s 左右达到行程最大值,收回阶段同展开阶段类似。

反推力装置的工作负载来源于发动机外涵道高压气流对阻流门作用的气动载荷,在数值上等于阻流门前后承压面的压差与阻流门承压面的面积乘积^[16]。由空气动力学中流量连续可知,被阻流门折返流过叶栅通道的气体质量流量和流过外涵道的气体质量流量只与通道面积有关,由此被阻流门折返流过叶栅通道的气体质量流量可通过

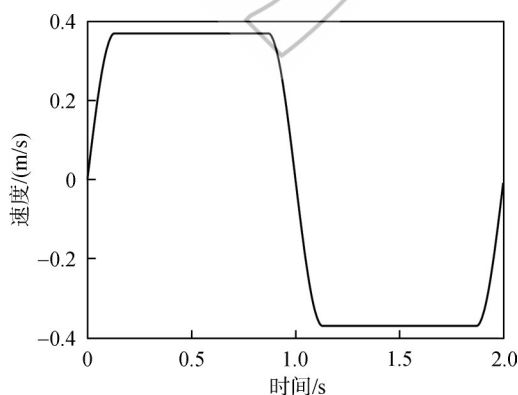


图5 移动外罩速度曲线

Fig.5 Speed curve of translating sleeve

计算获得。基于上述气体质量流量分析及发动机喷嘴流场CFD方法^[11]可获得阻流门开始转动后,其前后承压面压差与其角位移之间的关系,如图6所示。

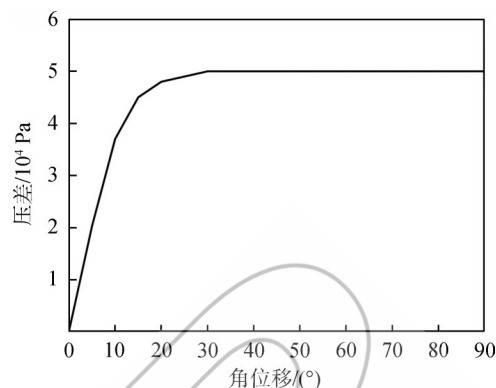


图6 阻流门前后承压面的压差曲线

Fig.6 Pressure difference curve between front and back of blocker door

分析可计算出阻流门在转动过程中任意时刻的气动载荷,并考虑阻流门拉杆及移动外罩对阻流门的作用力,根据式(9),选取其中一个阻流门为例,经仿真得出其受力曲线如图7所示。

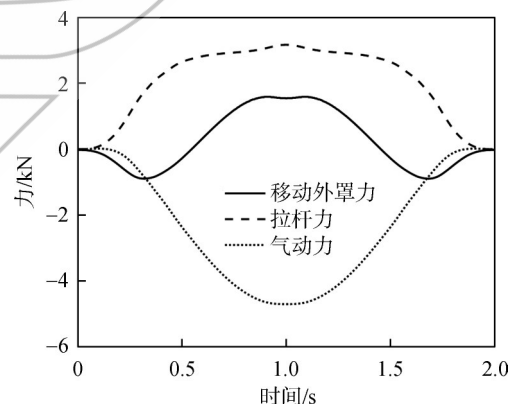


图7 阻流门受力曲线

Fig.7 Force curve of blocker door

气动力以及移动外罩力在1 s左右(即在反推力装置完全展开时)达到最大值,可以发现气动力、拉杆力、移动外罩力三者处于力平衡状态,符合动力学分析结果,且仿真结果与文献[15]仿真曲线趋势一致。

更进一步,将反推力装置按上述主要尺寸在 ADAMS 软件下进行三维简化建模,具体模型如图8所示。

利用 ADAMS 提供的构件特征点运动轨迹曲线绘制功能,在需要跟踪轨迹的构件上建立

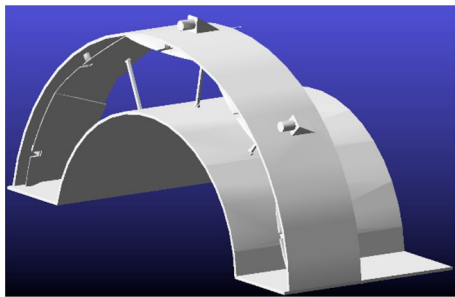


图8 反推力装置简化三维模型

Fig.8 Simplified three-dimensional model of thrust reverser

Marker点,即可在仿真同时绘制Marker点的轨迹曲线。选择移动外罩上铰链点 M 、阻流门上铰链点 P 与下边缘点 N 为Marker点,得到上述特征点的轨迹曲线如图9所示。由图可直观地看出,移动外罩、阻流门上各特征点之间并未发生干涉,与运动学分析的结果一致,反推力装置可以正常实现展开/收回过程。

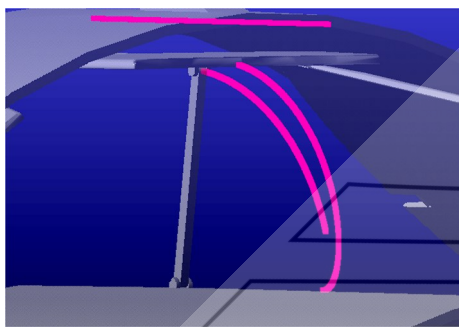


图9 Marker点运动轨迹

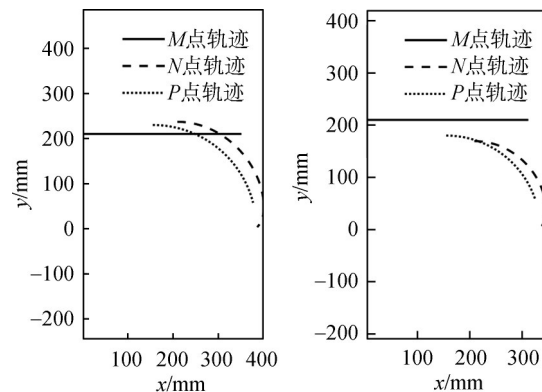
Fig.9 Marker point movement trajectory

3.2 不同结构参数下运动学及动力学特性分析

如果对反推力装置中各部件的尺寸参数选择不合理,将导致机构卡滞、构件干涉等现象。图10为两组不同结构参数下(l, h, m, n)反推力装置上各特征点的轨迹在平面的投影曲线, x, y 分别表示特征点在 x 和 y 轴方向的位移,其中参数 $l=230\text{ mm}$ 、 $h=210\text{ mm}$ 、 $m=155\text{ mm}$ 、 $n=55\text{ mm}$ 见图10(a); $l=190\text{ mm}$ 、 $h=210\text{ mm}$ 、 $m=160\text{ mm}$ 、 $n=50\text{ mm}$ 见图10(b)。

在图10(a)曲线中,移动外罩按预定设计平动,阻流门向“下”折转,阻流门上点 P 、点 N 均与移动外罩上点 M 发生干涉,而图10(b)曲线中阻流门上点 P 与点 N 之间发生干涉,使其无法按设计要求折转 90° 并完全遮挡发动机外涵道,在实际工况中反推力装置均出现卡死现象。

如果选取不同的结构参数,即使满足反推力

(a) $l=230\text{ mm}$ 、 $m=155\text{ mm}$ 、 $n=55\text{ mm}$ (b) $l=190\text{ mm}$ 、 $m=160\text{ mm}$ 、 $n=50\text{ mm}$ 图10 不同参数选择下特征点轨迹曲线($h=210\text{ mm}$)Fig.10 Trajectory curves of feature points in different parameter selections ($h=210\text{ mm}$)

装置不发生干涉的条件,能够正常运动,但其动力学特性也未必相同。图11为两组不同参数下阻流门所受到移动外罩对其的作用力。

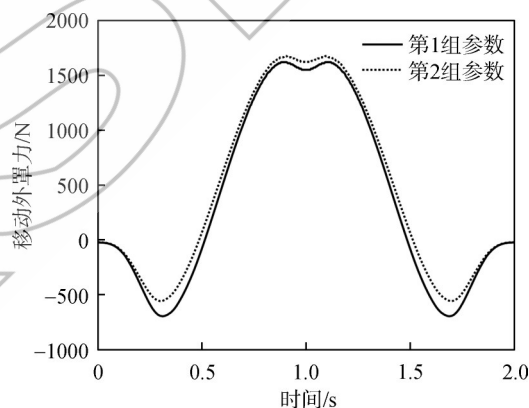


图11 阻流门受移动外罩作用力

Fig.11 Force of translating sleeve on blocker door

由图11可以看出,在两组不同结构参数下,阻流门受到的移动外罩力达到最大值的时间不同,且第一组参数下移动外罩力的最大值比第二组结构参数下的最大值降低了约1.04%,而阻流门受到的移动外罩力总和等于反推力装置对作动系统的总负载力,可见第一组参数下的反推力装置的总负载力更小。

3.3 反推力装置结构优化分析

根据前述建立的式(12)~式(18)反推力装置结构优化模型,在数学上可归为求解约束优化问题,这类问题的通用数学描述如下:

目标函数

$$\min f(x) \quad (19)$$

约束条件

$$g(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, q \quad (20)$$

$$h(x) = 0, j = q + 1, \dots, m \quad (21)$$

$$x \in D \quad (22)$$

求解约束优化问题的方法有许多,比较典型的约束优化方法有梯度法、牛顿法、惩罚函数法等。相比较于梯度法与牛顿法,惩罚函数法具有良好的收敛性,且在工程中广泛应用。惩罚函数法的核心思想是通过建立罚函数与惩罚因子将约束优化问题转化为无约束优化问题,并最终通过搜索使得无约束问题的解收敛于目标问题的解^[20]。

本文基于结构优化数学模型,在 Matlab 环境下,采用惩罚函数法对反推力装置各部件结构尺寸进行优化求解。外涵道间距 h 是发动机设计的重要设计变量,其大小影响发动机的气动性能,受发动机总体结构限制,此处不作为优化变量。选取反推力装置结构参数作为优化的初始值,并初步限定各部件结构参数范围如表 1 所示。

表 1 反推力装置各部件结构参数优化范围

Table 1 Components structural parameter range for thrust reverser optimization

参数	初始值	最小值	最大值
l/mm	210	205	215
m/mm	155	50	215
n/mm	53	50	215
$\varphi_{\max}/(^{\circ})$	88	85	90

在 Matlab 下通过惩罚函数法求解并得到该优化模型的最优解为 $l^* = 210.3854 \text{ mm}$ 、 $m^* = 153.9108 \text{ mm}$ 、 $n^* = 55.2516 \text{ mm}$ 、 $\varphi_{\max}^* = 89.505^{\circ}$ 。通过对比发现优化后的阻流门 MP 段长度减小了 0.7%, PN 段长度增大了 4.25%, 阻流门拉杆长度增加了 0.18%, 阻流门完全遮挡位置的夹角 $\varphi_{\max}$ 增加了 1.7%。

进一步,以优化设计获得的上述反推力装置结构参数,仿真得到优化前后反推力装置负载力对比曲线如图 12,优化后各部件特征点的轨迹曲线如图 13 所示。

由图 12 优化前后负载力对比曲线可知,在移动外罩展开阶段 0.3 s 左右,反推力装置对作动系统的总负载力达到正向最大值,经优化后反推正向最大总负载力下降了 24.5%。在展开阶段 0.9 s 左右,反推力装置对作动系统的总负载力达负向最大值,经优化后反推负向最大总负载力下降了

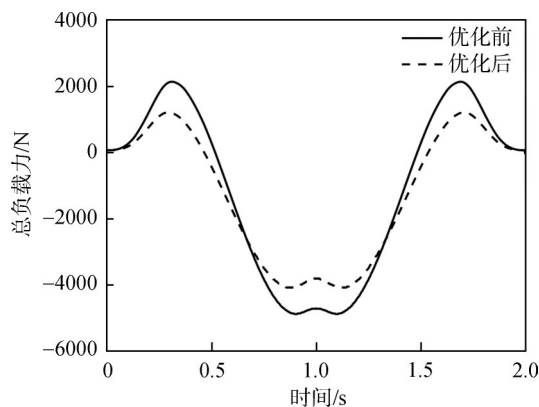


图 12 优化前后反推力装置负载力对比曲线

Fig.12 Load force comparison curve of thrust reverser before and after optimization

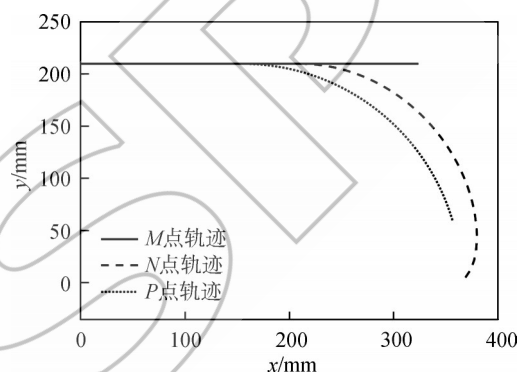


图 13 优化后特征点轨迹曲线

Fig.13 Trajectory curve of characteristic points after optimization

16.3%, 移动外罩收回过程总负载力减小情况与展开阶段相似。同时,由图 13 可知,优化后的结构参数可保证各个机构运动不出现干涉,整个反推力装置可正常运动。

4 结 论

以叶栅式反推力装置为研究对象,在分析运动学及动力学模型的基础上建立结构优化数学模型,并对反推力装置结构进行优化设计,得出结论如下:

1) 反推力装置部件结构参数设计不合理,不仅影响反推力装置的动力学性能,严重还会导致机构间发生干涉,无法运动。

2) 以反推力装置对作动系统的最大负载力极小化为目标函数,装置各运动机构满足几何关系为约束条件建立了反推力装置结构优化数学模型。优化后反推正向最大总负载力下降了 24.5%, 负向最大总负载力下降了 16.3%, 反推力装置的动力学性能明显改善。

论文采用的优化建模方法及优化结果可为反推力装置结构设计提供参考。

参考文献:

- [1] 靳宝林,邢伟红,刘殿春.飞机/发动机推进系统反推力装置[J].航空发动机,2004,30(4):48-52,58.
JIN Baolin, XING Weihong, LIU Dianchun. Thrust reversers of aircraft engine propulsion system[J]. Aeroengine, 2004, 30(4):48-52, 58. (in Chinese)
- [2] 邵万仁,叶留增,沈锡钢,等.反推力装置关键技术及技术途径初步探讨[R].广东深圳:大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会学术年会,2007.
- [3] 饶祺,盛鸣剑,韩涛锋,等.发动机反推力装置研究[J].科技广场,2014(2):91-94.
RAO Qi, SHENG Mingjian, HAN Taofeng, et al. Research on engine thrust reverser[J]. Science and Technology Square, 2014(2):91-94. (in Chinese)
- [4] 沙江,徐惊雷.发动机反推力装置及其研究进展[R].广东深圳:大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会学术年会,2007.
- [5] 何宝明,罗彬.叶栅式反推力装置平面作动机构运动规律研究[J].机电信息,2020(14):14-15.
HE Baoming, LUO Bing. Research on the motion law of the plane actuating mechanism of cascade thrust reverse device[J]. Electromechanical Information, 2020(14):14-15. (in Chinese)
- [6] 陈俊,雷晗,单勇.叶栅式反推力装置推力性能研究[J].航空计算技术,2019,49(2):34-36,42.
CHEN Jun, LEI Han, SHAN Yong. Research on thrust performance of cascade reverse thrust device[J]. Aviation Computing Technology, 2019, 49(2):34-36, 42. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 何杰.飞机反推力装置动力学分析及结构优化[D].西安:西安电子科技大学,2020.
HE Jie. Dynamic analysis and structure optimization of aircraft thrust reverser[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [9] 张国栋,王强.主要几何参数对叶栅式反推力装置性能的影响[J].航空动力学报,2012,27(1):145-151.
ZHANG Guodong, WANG Qiang. The influence of main geometric parameters on the performance of cascade reverse thrust device[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(1):145-151. (in Chinese)
- [10] 张云浩,额日其太.反推力装置叶栅布置的气动/结构耦合设计[J].沈阳工业大学学报,2012,34(1):56-62.
ZHANG Yunhao, Eriqitai. Aerodynamic/structural-coupling design of the cascade arrangement of thrust reverser[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2012, 34(1):56-62. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 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 of the suction characteristics of thrust reverser when landing[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(3):733-739. (in Chinese)
- [13] 王鹏.民用客机反推装置气动优化设计研究[D].上海:上海交通大学,2019.
WANG Peng. Research on aerodynamic optimization design of reverse thruster for civil airliner[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)
- [14] 张少军,王汉平,何江军,等.叶栅式反推装置的受载与传力[J].四川兵工学报,2015,36(3):56-59.
ZHANG Shaojun, WANG Hanping, HE Jiangjun, et al. Load and force transmission of cascade thrust reverser[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(3):56-59. (in Chinese)
- [15] 陈永琴,何杰,苏三买.反推力装置运动学与动力学仿真[J].航空动力学报,2019,34(11):2316-2323.
CHEN Yongqin, HE Jie, SU Sanmai. Kinematics and dynamics simulation of thrust reverser[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(11):2316-2323. (in Chinese)
- [16] 汪天兴.飞机反推力装置及其作动系统建模与仿真研究[D].西安:西安电子科技大学,2017.
WANG Tianxing. Research on modeling and simulation of aircraft thrust reverse device and its actuation system[D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [17] 施光林,泮健.飞机地面模拟试验反推力电液加载系统的实现[J].中国工程机械,2010,21(1):42-45.
SHI Guanglin, PAN Jian. Electro-hydraulic force servo system for simulating thrust in reverse of experimental systems on the ground for airplane[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(1):42-45. (in Chinese)
- [18] LIU Chao, DENG Junxiang, SU Sanmai. Design of loading system for thrust reverser ground simulation test[J]. Institute Of Physics Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 170(4):042093.1-042093.11.
- [19] 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 thrust reverser system safety design[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(7):1784-1792. (in Chinese)
- [20] 林强,吴赛龙.基于MATLAB及惩罚函数法的斜齿轮传动优化设计[J].机械工程师,2016(12):112-114.
LIN Qiang, WU Sailong. Optimal design of helical gear transmission based on MATLAB and penalty function method[J]. Mechanical Engineers, 2016(12):112-114. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)