

反推力装置运动学与动力学仿真

陈永琴¹, 何杰¹, 苏三买²

(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)

摘 要: 为了研究叶栅式反推力装置各部件在工作过程中的运动学与动力学特性,根据机构运动原理对反推力装置进行简化并建立了运动学与动力学数学模型。以滑动整流罩位移与阻流门所受气动负荷为输入进行运动学与动力学仿真,得到了反推力装置各部件的位移、速度及受力特性曲线,并对比分析了在不同尺寸参数下各部件特征点的运动轨迹和反推力装置负载力变化。结果表明:运动学及动力学仿真结果与工程实际相符;反推力装置机构参数选择不合理时,各设计点会发生干涉现象并导致机构无法运动;机构参数变化对负载力最大值影响尤为突出,在阻流门AC段长度值增大6%,阻流门CB段长度值减小9%的情况下,负载力正向最大值将增大19.53%,负向最大值增大12.67%。研究方法 & 研究结果可为反推力装置运动学及动力学分析,以及为反推力装置机构优化设计提供参考。

关 键 词: 叶栅式反推力装置;滑动整流罩;阻流门;运动学与动力学仿真;运动轨迹与负载力

中图分类号: V228.7

文献标志码: A

Kinematics and dynamics simulation of thrust reverser

CHEN Yongqin¹, HE Jie¹, SU Sanmai²

(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)

Abstract: In order to study the kinematics and dynamics characteristics of cascade type thrust reverser, the mechanism was simplified and the kinematics and dynamics mathematical model of thrust reverser was established according to the motion principle. Taking displacement of translating sleeve and pneumatic load of blocker door as the input, the displacement, velocity and force characteristic of thrust reverser were simulated, and the trajectory of feature points and the thrust reverser load force under different size parameters were comparatively analyzed. The results showed that: the kinematics and dynamics simulation results were in conformity with the real working process. When the mechanism parameters of thrust reverser were selected unreasonably, the interference phenomenon occurred between components. The change of components parameters had a remarkable influence on the maximum load force; when the length of the AC segment of blocker door increased by 6% and the CB segment decreased by 9%, the positive maximum load force increased by 19.53% and the negative maximum load force increased by 12.67%. The model and research results can provide a reference for the kinematics and dynamics analysis and optimization design of the thrust reverser structure.

收稿日期: 2019-04-26

作者简介: 陈永琴(1971—),女,副教授,博士,主要从事机械结构设计与动力学仿真研究。

引用格式: 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.

Key words: cascade type thrust reverser; translating sleeve; blocker door; kinematics and dynamics simulation; trajectory and load force

大型客机与军用运输机通常采用大涵道比涡扇发动机作为动力装置,随着飞机运载能力提高以及发动机推力增大,使得起飞和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,影响飞机安全工作。为此,大型客机与军用运输机普遍使用反推力装置,在降落时通过该装置改变发动机喷气出口气流方向以产生反向推力,缩短飞机着陆时的滑跑距离^[1-4]。

飞机上使用的反推力装置主要包括叶栅式、阻流门式和抓斗式,其中叶栅式反推力装置使用最广泛,主要由作动系统和反推力运动组件组成,工作时,通过作动系统推动反推力运动组件的阻流门翻转,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^[5-7]。

反推力运动组件是叶栅式反推力装置的执行机构,对其进行力学分析,研究各部件的运动学与动力学特性是反推力装置结构设计、参数优化、作动系统动力需求分析的重要基础。

叶栅式反推力装置虽然在飞机上应用广泛,然而关于反推力装置运动学与动力学分析与仿真研究的文献甚少。目前国内外关于叶栅式反推力装置的研究主要集中在运用 CFD 进行的气动流场分析^[8-9]、反推力装置气动性能研究^[10-12]、反推力装置液压作动系统设计^[13-14]、叶栅式反推力装置的卸载与传力^[15]、反推力装置试验加载系统设计^[16]、发动机反推力系统安全性设计^[17-18]等方面。其中文献^[15]利用多体动力学软件建立了反推力装置动力学模型,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,仿真分析了反推力装置关键零件的载荷特性,但并未给出反推力装置运动学及动力学数学模型及计算方法。

本文以叶栅式反推力装置(下文简称为反推力装置)为研究对象,在对反推力装置进行结构分析的基础上,建立机构的运动学及动力学数学模型,并仿真分析不同结构参数下反推力装置主要运动部件的速度、位移及运动轨迹等运动学参数,以及各运动部件典型工作点受力与反推力装置的负载力等动力学参数。

1 反推力装置原理及机构模型

叶栅式反推力装置由两个如图 1 所示的半部

对称布置组成,主要包括滑动整流罩、叶栅、阻流门、阻流门拉杆、作动筒等部件。通常反推力装置经预设的吊挂点与飞机的机翼相连,安装在机翼下的短舱中部。

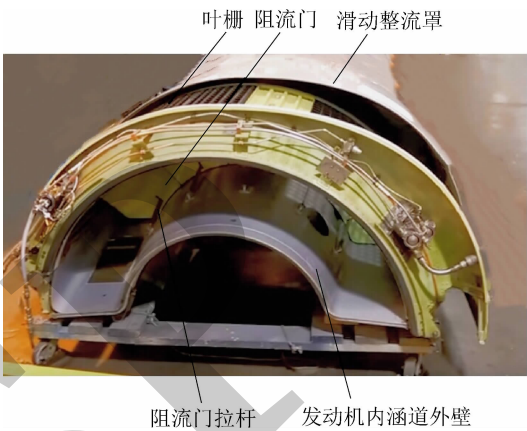
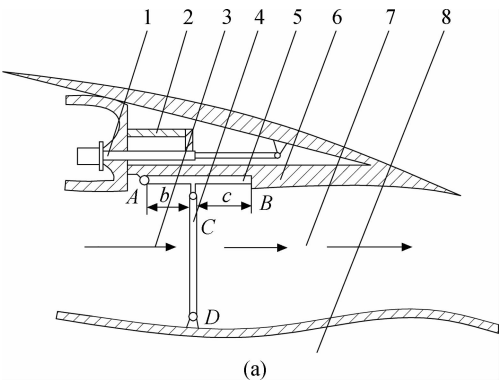


图 1 反推力装置(半部)实物图

Fig. 1 Cascade type thrust reverser (half part)

为便于后续对反推力装置进行运动学与动力学分析,图 2 给出典型的叶栅式反推力装置工作原理及简化结构示意图。

飞机在空中飞行过程中,反推力装置始终处于关闭状态,如图 2(a)所示,此时端面呈梯形的阻流门 5 在阻流门拉杆 4 的作用下移动到与滑动整流罩 6 内腔平行的位置,遮挡住叶栅 2 的气流通道,风扇出口的气流从发动机外涵道 7 喷出,产生正向推力。当飞机降落滑行时,反推力装置打开,其机构在展开过程中的运动为:作动筒 1 在控制作用下伸展,驱动滑动整流罩 6 向后平移,阻流门 5 的一端与滑动整流罩相连,随滑动整流罩向后运动,另一端与阻流门拉杆 4 通过铰链相连,在阻流门拉杆的作用下转动。从图 2(a)关闭状态



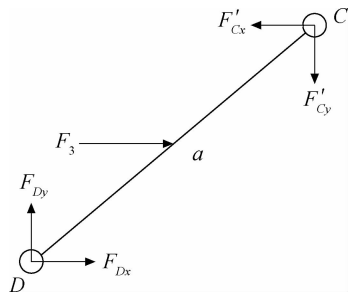


图 4 阻流门拉杆受力简图

Fig. 4 Force diagram of blocker door drag link

$$\begin{cases} F_3 + F_{Dx} - F'_{Cx} = 0 \\ F_{Dy} - F'_{Cy} = 0 \\ M_D = F_3 \frac{a}{2} \sin \theta + F'_{Cy} a \cos \theta - F'_{Cx} a \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)、式(7)计算可得反推力装置负载力 F_1 如式(8)所示

$$F_1 = -\frac{[bF_3 + (b+c)F_2]\sin \theta \sin \varphi}{2b \sin(\theta + \varphi)} - F_2 - \frac{F_3 b \sin \theta \cos \varphi - F_2(b+c) \sin \varphi \cos \theta}{2b \sin(\varphi - \theta)} \quad (8)$$

由于阻流门拉杆呈细长杆,且位于气流的流道内,拉杆前后环面承受的气动压差不大,因此忽略阻流门拉杆所受气动载荷 F_3 。当反推力装置各部件的主要结构尺寸参数 a 、 h 、 b 及 c 确定后,给定由发动机出口流场计算得到的气动载荷 F_2 ,可由上述式(6)到式(8),计算出反推力装置工作过程中滑动整流罩、阻流门及阻流门拉杆在任意时刻的载荷变化特性。

3 反推力装置运动学和动力学仿真分析

3.1 反推力装置运动学仿真

以叶栅式反推力装置为研究对象,采用反推力装置工作过程中滑动整流罩位移随时间变化为输入进行运动学仿真。

文献[8]参考美国军用标准给定了 9 组不同的滑动整流罩及阻流门运动控制规律。文献[10]给出了 2 组滑动整流罩平移速度规律。本文参考上述文献,选择滑动整流罩的位移规律如图 5 所示。

通常,反推力装置从完全关闭位置到完全打开位置的时间不大于 2 s,关闭阶段相似,在飞机上处于完全打开的状态会保持 10~15 s,直至滑跑速度降至安全速度以内^[20]。由于打开并处于

保持的时间段内,反推力装置各部件运动学特性维持不变。因此,为缩短仿真周期并着重分析反推力装置打开/关闭过程中部件的运动学特征,图 5 中取滑动整流罩位移保持完全打开状态的时间为 1 s。

以某型叶栅式反推力装置为对象,以图 5 滑动整流罩位移曲线为输入,仿真得到的反推力装置主要部件位移曲线如图 6 所示。

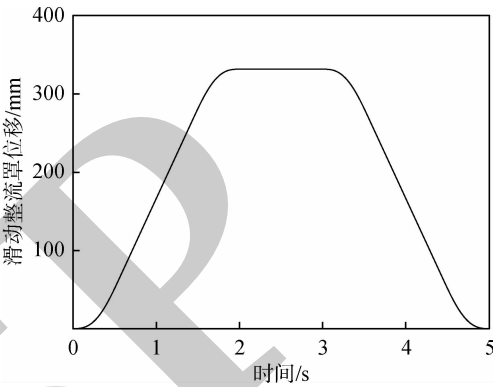


图 5 滑动整流罩位移曲线

Fig. 5 Displacement curve of translating sleeve

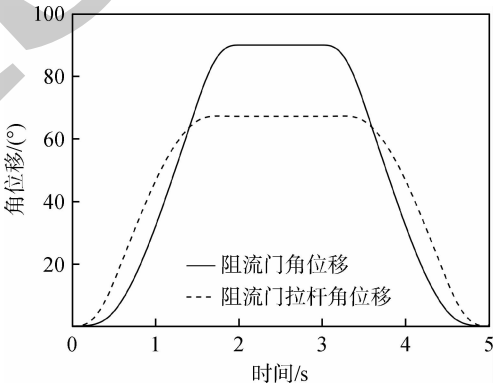


图 6 反推力装置主要部件位移曲线

Fig. 6 Displacement curves of main components of thrust reverser

阻流门在滑动整流罩的驱动和阻流门拉杆的牵引下围绕滑动整流罩做动轴转动。由图 6 中阻流门角位移曲线可知,在 0~2 s 内,阻流门运动到与初始位置成 90°的位置,如图 2(b),此时阻流门与滑动整流罩垂直,发动机外涵道出口气流被阻流门遮挡,气流折转从短舱上的叶栅喷出,发动机外涵气流为飞机提供的正向推力变为反向推力。在反推力装置关闭阶段,阻流门由 90°位置恢复为水平,其位移特性与上述情况相反。

阻流门拉杆与发动机外涵道内壁铰接,并以

不同于阻流门转速的角速度做定轴转动。由图 6 可知,在反推力装置打开过程中,阻流门拉杆转动最大角位移约为 65° 。

图 7 为仿真得到的反推力装置主要部件速度曲线。

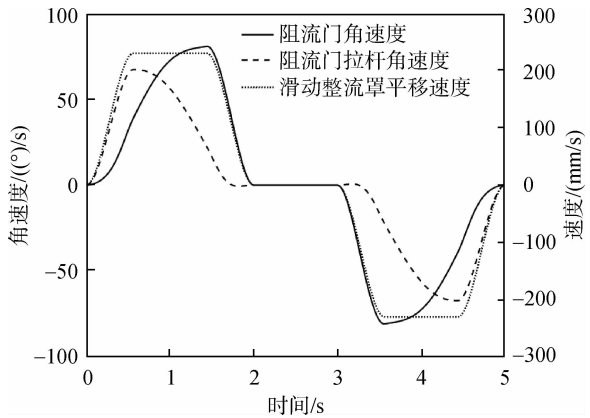


图 7 反推力装置主要部件速度曲线

Fig. 7 Velocity curves of main components of thrust reverser

由图 7,反推力装置开始工作时,滑动整流罩的平移速度迅速上升并在约 0.5 s 时达到最大,在此阶段,阻流门角速度缓慢增大,由其位移曲线可知阻流门约转动了 25° ,而阻流门拉杆角速度迅速上升并在 0.5 s 时达到最大;此后滑动整流罩平移速度保持匀速并在约 1.5 s 时开始迅速下降,在此阶段内,阻流门角速度迅速上升并达到最大,而阻流门拉杆角速度不断下降并在 1.5 s 时降至接近为零;随后滑动整流罩平移速度、阻流门角速度迅速下降并在阻流门翻转至完全遮挡住外涵道时下降为零,反推力装置完成打开过程。此后,反推力装置保持打开状态,滑动整流罩、阻流门及阻流门拉杆速度为零。在反推力装置关闭阶段,上述部件的速度变化与打开阶段类似,只是方向相反。

图 6 与图 7 与文献[19]对反推力装置运动学仿真曲线特征与趋势一致,表明本文所建模型与仿真结果反映了反推力装置工作过程。

3.2 不同结构参数下主要特征点的轨迹分析

叶栅式反推力装置结构设计时,要求滑动整流罩做平移运动,阻流门在拉杆旋转及滑动整流罩平移的驱动下做组合运动。图 2 中,当机构的尺寸参数 a 、 h 、 b 及 c 选择不合理时,在反推力装置打开/关闭过程中,将出现卡滞、构件干涉甚至机构无法运动等现象。

在图 2 所建立的坐标系下,某型叶栅式反推力装置尺寸参数 a 、 h 、 b 及 c 在设计状态下滑动整

流罩上铰链点 A、阻流门上铰链点 C 与点 B 的运动轨迹如图 8 所示。由图可知,滑动整流罩按预定设计做平移运动,阻流门按设计要求可折转 90° 并完全阻挡发动机外涵道,部件之间配合与工作良好。

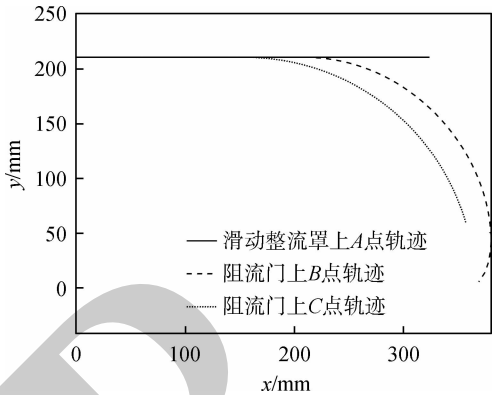


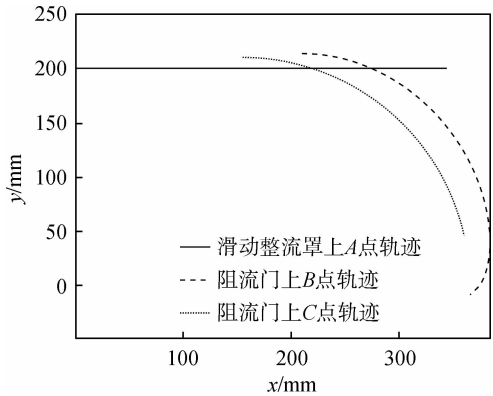
图 8 反推力装置部件特征点设计状态运动轨迹曲线

Fig. 8 Trajectory curves of thrust reverser featured points at design parameters status

图 9(a)为保持机构的尺寸参数 a 、 c 不变, h 增大 5%, b 增大 8% 时反推力装置部件特征点运动轨迹曲线。图 9(b)为机构的尺寸参数 h 、 c 保持不变, a 减小 10%, b 减小 6% 时反推力装置部件特征点运动轨迹曲线。

由图 2 可知,阻流门与滑动整流罩在物理上始终通过 A 点连接,阻流门拉杆与阻流门通过 C 点铰链连接,因此阻流门的下边缘 B 点与阻流门上 C 点在反推力装置整个工作过程中不可能越过滑动整流罩之外。同时,阻流门的下边缘 B 点与阻流门上 C 点在整个工作过程中也不可能出现相互干涉情况。

由图 9(a)中运动轨迹可以看出,在不考虑物理约束的情况下,阻流门上点 B、C 越过滑动整流罩,与滑动整流罩上点 A 发生干涉,实际工作时反推力装置将出现卡死。图 9(b)中阻流门上点



(a) a 、 c 不变, h 增大 5%, b 增大 8%

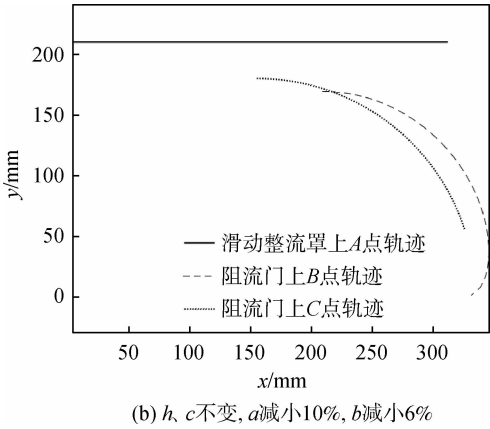


图 9 反推力装置部件特征点非设计状态运动轨迹曲线
Fig. 9 Trajectory curves of thrust reverser featured points at non-design parameters status

B、C 发生干涉,使其无法实现阻流门折转并遮挡外涵道的要求,在实际工作时反推力装置将无法运动。

图 8 与图 9 仿真表明,只有合理选择各部件尺寸参数,才能保证反推力装置实现预期的位移、速度等运动学特性要求。

3.3 反推力装置动力学仿真

动力学计算主要包括阻流门、阻流门拉杆及滑动整流罩在反推力装置工作过程中的受力变化。其中,反推力装置的工作阻力来自于发动机外涵道高压气流对阻流门作用的气动载荷,该力在数值上等于阻流门前后承压面的压差与阻流门承压面面积的乘积,力的变化与外涵道出口流场温度、压力以及阻流门角位移等因素密切相关^[19]。依据文献[10]中阻流门内外表面静压变化曲线,并基于发动机喷口流场 CFD 方法,计算获得阻流门所受的气动载荷如图 10 所示。

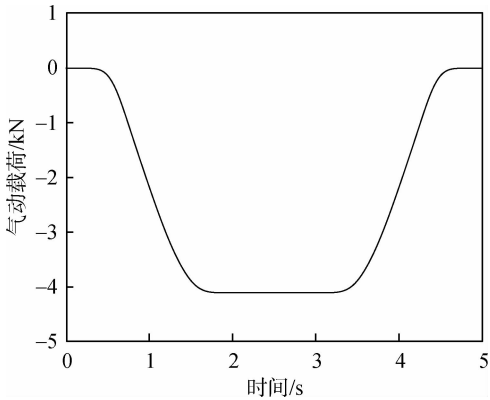


图 10 阻流门所受气动载荷变化曲线
Fig. 10 Aerodynamic load curve of blocker door

仍然以某型叶栅式反推力装置为对象,以图 5 滑动整流罩位移曲线与图 10 阻流门气动载荷曲线为输入,仿真得到滑动整流罩沿其平动方向的作用力,也即反推力装置的负载力如图 11 所示。

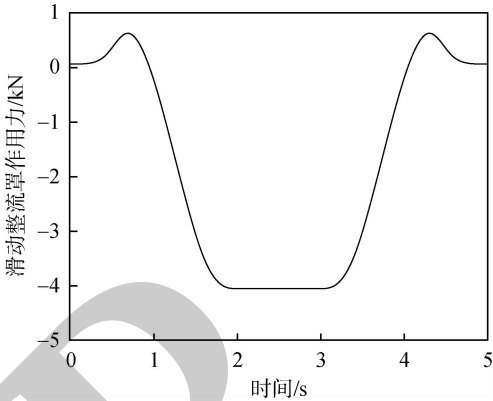


图 11 滑动整流罩作用力曲线
Fig. 11 Moving force curve of translating sleeve

结合图 7 速度曲线,可以看出,图 11 所示滑动整流罩作用力在反推力装置打开初始阶段表现为驱动力,并在滑动整流罩速度上升到最大且转为匀速时驱动力达到最大;随着阻流门角位移继续增大,该作用力迅速下降,并在 0.95 s 时由驱动力变为反向阻力,当阻流门完全打开时阻力达到最大。

阻流门拉杆的受力(图 4 中 F'_{cx} 与 F'_{cy} 的合力)曲线如图 12 所示。阻流门对阻流门拉杆的作用力在约 1 s 时达到最大值,此时阻流门作用于滑动整流罩的力由驱动反推力装置打开变为阻碍反推力装置工作。在反推力装置完全打开时到开始关闭的这段时间内,阻流门对拉杆的作用力接近为零,通过阻流门传递到滑动整流罩的负载力几乎全部承担了阻流门上的全部气动载荷。

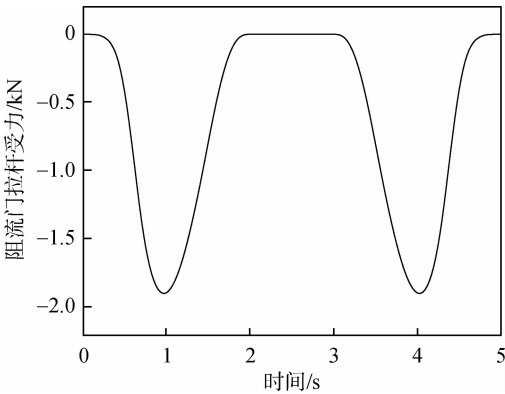


图 12 阻流门拉杆的受力曲线
Fig. 12 Force curve of blocker door drag link

阻流门的受力有三个:一是等效作用在阻流门质心处,始终与发动机轴线方向一致的阻流门气动载荷;二是滑动整流罩对阻流门的作用力,该力与图 11 所示滑动整流罩作用力大小相等,方向相反,并随阻流门的运动而变化;三是阻流门拉杆对阻流门的作用力,沿拉杆方向随阻流门的运动而变化。阻流门上述受力仿真曲线如图 13 所示。

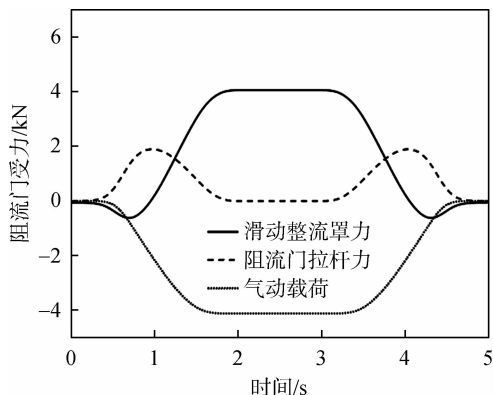


图 13 阻流门受力曲线

Fig. 13 Force curves of blocker door

由图 13 可知,在滑动整流罩匀速运动前,阻流门上所受力均处于较小的状态;随着滑动整流罩开始匀速运动,各力数值不断增大并在 1s 时几乎都达到最大值,在此阶段内阻流门所受的阻流门拉杆力为阻流门翻转的驱动力,阻流门所受的滑动整流罩力及其上的气动载荷阻碍阻流门的翻转。随着阻流门继续翻转,其所受阻流门拉杆力开始不断减小并在阻流门翻转至 90° 时接近降为零,其所受滑动整流罩力和气动载荷则不断增大并达到相应最大值,在此阶段内,滑动整流罩力和阻流门拉杆力均为阻流门翻转的驱动力,气动载荷始终阻碍阻流门的翻转。反推力装置关闭阶段阻流门受力特性与打开阶段相似。

3.4 不同结构参数下负载力对比分析

负载力的大小是反推力装置作动系统设计的重要依据。由负载力计算式(8)可知,反推力装置部件结构尺寸选择对反推负载力数值影响较大,尤其是阻流门 AC 段长度值改变影响尤为明显。在满足反推力装置轨迹要求,即各部件不干涉且反推力装置可实现正常打开与关闭的情况下,选取阻流门 AC 段长度值增大 6%,阻流门 CB 段减小 9% 进行仿真,上述结构参数变化前后的负载力对比曲线如图 14 所示。

图 14 表明,结构参数变化对负载力正负向最

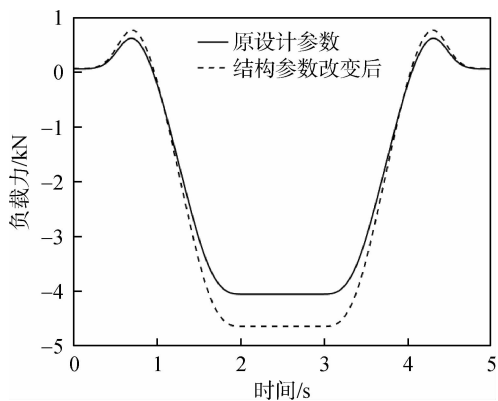


图 14 负载力对比曲线

Fig. 14 Comparison curves of load force

大值的影响尤为突出,相比原参数状态,参数变化后,负载力正向最大值增大了 19.53%,负向最大值增大了 12.67%。

图 11~图 13 仿真结果与文献[15,19]对反推力装置关键部件的载荷特性分析一致,表明本文建立的模型与仿真结果与工程实际相符。

4 结论

以叶栅式反推力装置为研究对象,建立了运动学与动力学模型并进行分析与仿真,取得的结论如下:

- 1) 运动学与动力学仿真模型及仿真结果能反映反推力装置的工作过程,与工程实际相符。
- 2) 反推力装置机构参数选择不合理,机构运动将发生干涉现象,导致机构无法运动。
- 3) 反推力装置结构参数不同,作用在作动系统上的负载力也不同,尤其对最大负载力变化影响明显,最大负载力是反推力装置作动系统最大负荷,也是作动系统设计的关键依据。在保证反推力装置轨迹要求的前提下,对机构的尺寸参数进行优化设计十分必要。
- 4) 所建立的反推力装置运动学与动力学模型可为反推力装置运动及动力分析,以及为反推力装置结构优化设计提供参考。

参考文献:

- [1] YETTER J A. Why do airlines want and use thrust reverser? [R]. NASA TM 95-109158, 1995.
- [2] 刘大响,叶培梁. 航空发动机设计手册:进排气系统[M]. 北京:航空工业出版社,2000.
- [3] 杜刚,金捷. 大型运输机反推力装置[R]. 广东 深圳:大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会,2007.
- [4] MCKAY B, BARLOW A. The ultra fan engine and aircraft

- based thrust reversing[R]. AIAA-2012-3919, 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, 14 (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 of the suction characteristics of thrust reverser when landing[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31 (3): 733-739. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] VARSEGOV V L, SHABALIN A S. Selection of an optimal turbulence model for numerical flow simulation in a cascade type turbofan engine thrust reverser[J]. Russian Aeronautics, 2015, 58(4): 484-487.
- [10] 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)
- [11] 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.
- [12] 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): 156-166.
- WANG Zhiqiang, SHEN Xigang, HU Jun. Prediction and evaluation of aerodynamic stability of high bypass ratio turbofan engine developed with thrust reverser[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(2): 156-166. (in Chinese)
- [13] 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, 32(11): 2791-2799.
- CHEN Yongqin, WANG Tianxing, SU Sanmai, et al. Modeling and simulation of thrust reverser hydraulic actuating system based on AMESim[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 2791-2799. (in Chinese)
- [14] O'BRIEN M. Boeing 777 thrust reverser actuation system [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 1998, 70(5): 364-366.
- [15] 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, 36(3): 56-59.
- ZHANG Shaojun, WANG Hanping, HE Jiangjun, et al. Load and force transmission of cascade thrust reverse[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(3): 56-59. (in Chinese)
- [16] 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, 17(1): 61-65.
- SHI Xianzhu. Loading test of a certain type of aircraft thrust reverser [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2012, 17(1): 61-65. (in Chinese)
- [17] 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, 13(1): 104-107.
- SUI Jiefei, ZHU Yan. Safety design and research of hydraulic thrust reverser[J]. Chinese Hydraulic and Pneumatic, 2016, 13(1): 104-107. (in Chinese)
- [18] 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. Safety design of engine thrust reverser[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(7): 1784-1792. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] 唐伟, 刘启国, 汪东. 军用反推力装置通用规范技术要素的确定[J]. 航空标准化与质量, 2013, 5(6): 7-10.

(编辑: 陈 越)