

文章编号: 1000-8055(2010)06-1297-06

叶栅式反推力装置阻流门运动规律对气动性能的影响

谢业平^{1,2}, 王 强¹, 邵万仁^{1,2}, 尚守堂^{1,2}

(1 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 在分析叶栅式反推力装置结构及工作原理的基础上, 通过计算初步研究了反推力装置运动规律对风扇出口及阻流门上气动载荷的影响. 计算结果表明, 反推力装置打开时, 运动规律直接影响风扇在反推力装置打开/关闭过程中工作点位置, 运动规律 3、4 分别适合风扇外涵喘振裕度较大、较小发动机的反推力装置选用; 各运动规律中, 阻流门气动载荷在阻流门开始转动瞬间加载.

关 键 词: 叶栅式反推力装置; 阻流门; 运动规律; 动网格; 风扇发动机

中图分类号: V228.7

文献标识码: A

Effect of kinetic mechanism of blocker doors on aerodynamic performance for a cascade thrust reverser

XIE Ye-ping^{1,2}, WANG Qiang¹, SHAO Wan-ren^{1,2}, SHANG Shou-tang^{1,2}

(1 School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2 Shenyang Aeroengine Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Based on the structure and working principle of the cascade thrust reverser, a preliminary research was conducted to analyze the impact of reverser's kinetic schedule on the exit static pressure of the fan and aerodynamic load of the blocker doors. The results show that, the kinetic schedule directly influences the position of fan's working point during deploying/retracting reverser process. Schedule 3 and 4 are suitable separately for reversers installed in engines with relatively small and big surge margin fan. For all kinetic schedules, aerodynamic load on blocker doors increases sharply once it starts operation.

Key words: cascade thrust reverser; blocker doors; kinetic mechanism; moving grid; turbofan

反推力装置由于其诸多优点在民机及军用运输机中得到了广泛的应用^[1]. 国外航空发达国家(如美、英、俄等)很早就开展了反推力装置的基础研究和工程研究, 在机械式反推力装置和飞发一体化设计方面技术十分成熟, 拥有完备的设计手

段、丰富的研制经验和完整的设计体系^[1-9].

叶栅式反推力装置因其具有集成度高、可靠性高、对反推气流控制好、对不同的发动机工况适应性强等优点^[10]而成为大涵道比($5 < R_{bp} < 9$)发动机广泛选用的对象. 但其也存在机械协调件

收稿日期: 2009-05-14; 修订日期: 2009-12-01

作者简介: 谢业平(1980-), 男, 湖南涟源人, 工程师, 硕士生, 主要从事航空发动机排气系统、反推力系统及舰用燃气轮机排气引射装置的设计研究.

多,结构复杂,工作过程运动规律复杂等缺点^[11]. 为保证反推力装置工作时与发动机的相容性,反推力装置的排气面积(叶栅出口面积及漏气面积之和)必须控制在特定限制范围内,如国外某发动机反推力装置从正推力状态到反推力状态的瞬态过程中,总有效面积(叶栅出口面积与未堵的外涵道面积之和)既不大于正推力时外涵喷口有效面积的125%,也不小于该值的85%,这主要是由发动机风扇外涵喘振裕度决定. 国外对叶栅式反推力装置性能计算及试验的相关文献较多,但鲜见关于阻流门运动规律对风扇气动性能的影响的文献.

本文对反推力装置打开的非稳态过程进行了初步计算分析,得出反推力装置运动规律对风扇出口静压及阻流门气动载荷的影响,获得优化运动规律,使之对风扇出口截面气动性能影响最小. 本文进行的探索性研究可供今后开展反推力装置阻流门运动规律及运动机构设计提供参考.

1 叶栅式反推力装置工作原理及运动规律

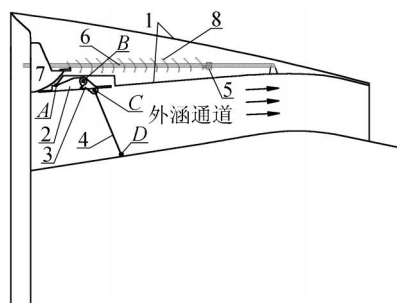
1.1 工作原理

图1为叶栅式反推力装置结构及流路示意图. 它由叶栅盒、作动系统、移动外罩、阻流门、拉杆、转接件及起固定框架作用的扭矩盒、上导轨梁、下导轨梁等组成. 正推力状态下,气流从外涵喷管喷出,产生正推力,反推力状态时,因移动外罩后移,露出叶栅,阻流门挡住发动机外涵道,使外涵气流转入导流叶栅中,并沿叶栅所偏转的方面排出,从而达到产生反推力的目的^[3,12].

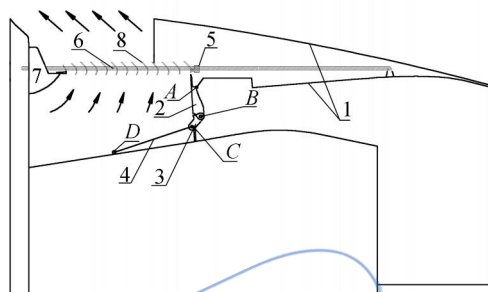
如图1所示,叶栅式反推力装置打开过程机构运动为:作动筒伸展驱动移动外罩1后移,阻流门2上的A点跟随移动外罩向后平移,阻流门通过转接件3带动拉杆4在以D为圆心的圆周上运动,从某特定位置开始,阻流门在拉杆和转接件的作用下,在随移动外罩向后平移的同时绕A点转动,达到图1(b)所示反推力状态. 移动外罩的运动为平动,而阻流门的运动为随移动外罩平动及绕平动的A点转动,通过更改作动筒的伸展速度,可改变移动外罩及阻流门的平移速度,而改变D点位置及转接件结构、拉杆长度等参数可改变阻流门开始转动的位置及转动角速度. 反推力装置关闭过程与打开过程机构运动相反.

1.2 移动外罩及阻流门的运动规律

反推力装置打开过程中,移动外罩及阻流门



(a) 正推力状态



(b) 反推力状态

1 移动外罩; 2 阻流门; 3 转接件; 4 拉杆
5 后支撑环; 6 作动筒; 7 扭矩盒; 8 叶栅盒

图1 叶栅式反推力装置结构及流路示意图

Fig. 1 Schematic illustration for a cascade thrust reverser and airflow

的平移速度一般为匀速移动,考虑到作动筒在启动与停止端的缓冲性能,给出了图2(a)中的两种平移速度分布. 不同发动机反推力装置在打开过程因阻流门结构、拉杆长度及位置的不同,阻流门开始转动的位置不同,图2(b)给出了阻流门三种不同的转动角速度分布,转动角速度1表示阻流门从开始至结束一直均匀转动;转动角速度2表示阻流门在第1s前只随移动外罩平移,从第1s开始匀速转动;转动角速度3表示阻流门在0.41s前只随移动外罩平移,从第0.41s开始随移动外罩平移的同时匀速转动. 通过组合移动外罩及阻流门的平移速度、阻流门的转动速度,形成表1所示4种反推力装置打开过程的运动规律.

2 数值模拟方法

2.1 计算域及网格划分

本文使用轴对称物理模型,采用动网格技术对反推力开启过程进行非稳态的数值模拟. 计算区域如图3所示,采用结构化与非结构化混合网格生成技术,叶栅区域采用加密的结构化网格,外流场采用网格密度渐变的结构化网格,为实现移动外罩移动过程中动网格的重构,在移动外罩内外采用非结构化网格,且网格密度渐变,使叶栅区

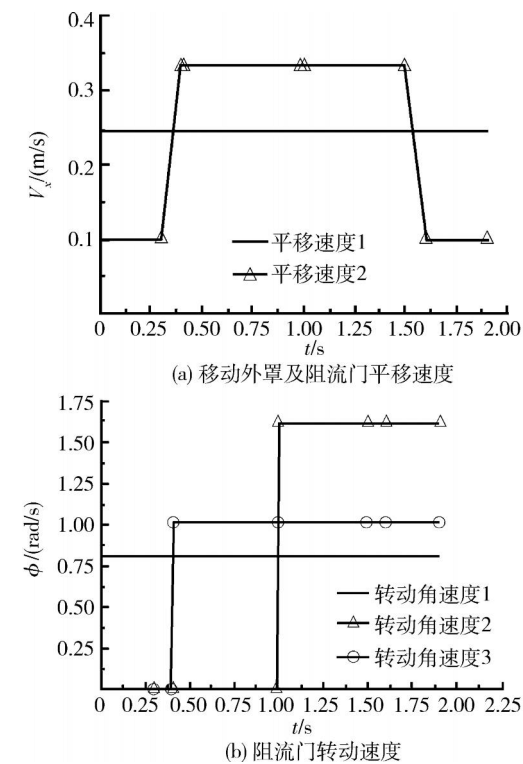


图 2 反推力装置打开过程中移动外罩及阻流门的
速度分布

Fig. 2 Velocity distribution on translating cowling
and blocker door during the process
of reverser deploying

表 1 移动外罩及阻流门的不同运动规律
Table 1 Kinetic mechanisms for translating
cowling and blocker door

运动规律	运动 规律 1	运动 规律 2	运动 规律 3	运动 规律 4
移动外罩阻 流门平动	平移 速度 1	平移 速度 1	平移 速度 2	平移 速度 2
阻流 门转动	转动角 速度 1	转动角 速度 2	转动角 速度 2	转动角 速度 3

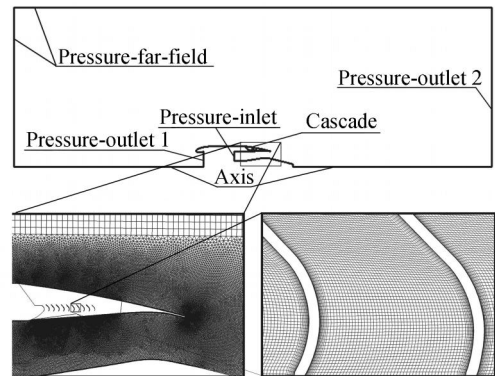


图 3 各运动规律下计算区域及网格示意图
Fig. 3 Computational zone and grid chart under
various kinetic rules

域加密结构化网格平缓过渡到外流场密度较小的
结构化网格。

反推力装置打开非稳态过程采用 Fluent 软
件中弹性光滑及局部重构算法对各时间点网格进
行光滑及局部重构. 弹性光滑模型用于网格节点
位移距离较小,且各节点的联接属性(拓扑结构)
不变时的网格运动. 此模型中需设置弹性常数(决
定变形区域的大小)、边界节点松弛因子(控制着
相邻内部节点的移动距离对变形边界上节点移动
幅度的影响程度)等参数. 局部网格重构用于确定
各时间步长哪些网格被重新划分. 局部网格重构
模型中需设置扭斜度范围及网格尺寸范围,在进
行下一个时间步长时,检查网格尺寸及扭斜度,当
扭斜度或尺寸超过用户规定的范围时,此处网格
将被重构.

2.2 计算方法及边界条件

Trapp L. G 等^[13]在叶栅式反推力装置数值
研究中,通过对理想气体使用基于密度的耦合算
法求解雷诺平均 Navier-Stokes (N-S) 方程和 Re-
alizable $k-\epsilon$ 湍流模型,方程的离散均采用二阶精
度的迎风差分,得出了精度较高的计算结果;本文
计算过程采用相同的计算方法,且近壁处采用标
准壁面函数.

计算移动外罩及阻流门运动规律时边界条件:
压力远场,外流场边界为压力远场,反推力装
置一般在飞机着陆滑行速度为 100~300 km/h 时
使用. 为简化计算,所有计算过程中均假设飞机
滑行速度为 150 km/h (41.7 m/s),压力、温度为标
准大气压条件.

压力出口 1,模拟风扇的吸气能力,调试此出
口压力,保证进入发动机进气道的流量为正推力
时内外涵流量之和,本文取压力为 75.6 kPa.

压力出口 2,整个计算区域出口为标准大气.

压力进口,为方便分析反推力装置在运动规
律 1,2,3,4 控制下打开过程对风扇的影响,假设
反推力装置打开过程风扇出口总压保持为 159
kPa、总温为 325 K 不变.

非定常条件,根据网格密度及移动外罩、阻
流门的运动速度确定时间步长 $\Delta T = 0.002$ s.

3 计算结果及分析

3.1 反推力装置打开过程典型时刻流场及对风扇
影响的初步分析

图 4 给出了运动规律 1 下的 4 个不同时刻反

推力装置附近局部流场马赫数等值线分布,总体上,随着移动外罩和阻流门的运动,风扇出口马赫数呈先降低后升高的趋势.在运动结束($T=2.0\text{ s}$)时,风扇出口马赫数基本恢复到初始状态($T=0\text{ s}$),表明反推力状态下有效排气面积与正推力状态下基本相当.无论是在 $T=1.0\text{ s}$ 还是在 $T=1.5\text{ s}$,阻流门关闭外涵通道的面积都要大于叶栅通道开口面积,这就导致了通过风扇的流量减小,风扇出口马赫数降低.严重的情况下,会导致风扇喘振.

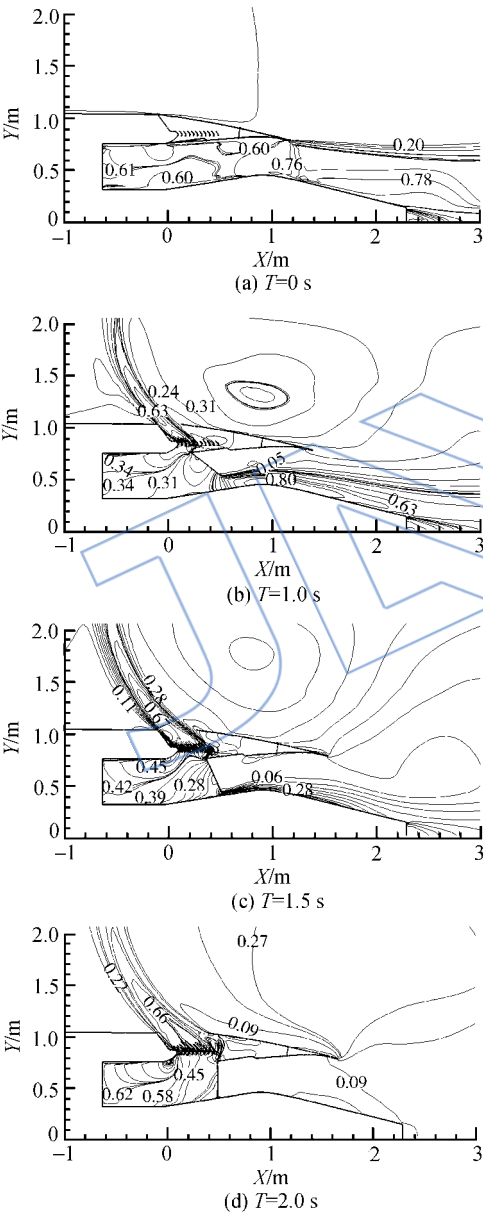


图 4 运动规律 1 控制下典型时刻反推力装置局部马赫数分布图

Fig. 4 Local Ma distribution at a typical time under kinetic rule 1

图 5 给出了运动规律 3 下的 4 个不同时刻反推力装置附近局部流场马赫数等值线分布.与图 4 不同的是:在运动过程中(如 $T=1\text{ s}$),风扇出口马赫数比正推力状态大.产生此现象的原因是阻流门关闭的面积小于叶栅通道打开的面积,在此运动下, $T=1\text{ s}$ 之前,阻流门未旋转,风扇出口排气面积为外涵喷管排气面积与叶栅通道开启面积之和,总排气面积远大于初始($T=0\text{ s}$)时刻的外涵喷管面积.流通面积的增加导致了通过风扇的流量增大,风扇出口马赫数增大,这会导致风扇工作点位置的改变.当运动规律 3 运动结束时($T=2.0\text{ s}$),风扇出口马赫数基本恢复到初始状态时的大小,这与运动规律 1 相当.

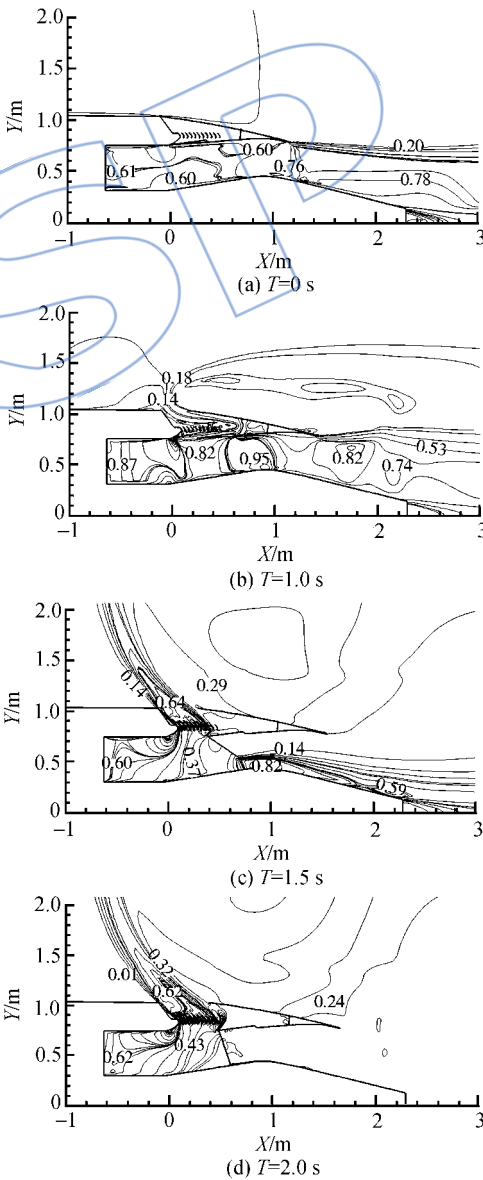


图 5 运动规律 3 控制下典型时刻反推力装置局部马赫数分布图

Fig. 5 Local Ma distribution at a typical time under kinetic rule 3

由此可知,反推力装置使用不同的运动规律时,打开过程中外涵通道流动情况不同,对风扇在此过程中的工作点位置产生直接的影响。

图 6 为反推力装置在运动规律 1,2,3,4 控制下运动时,风扇出口静压 p 相对于正推力状态下风扇出口静压 p_0 的变化曲线。

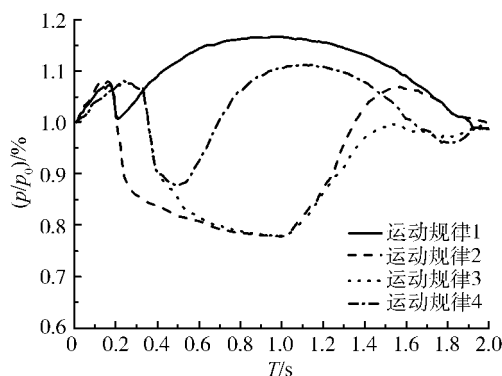


图 6 各运动规律下风扇出口静压变化曲线

Fig. 6 Variation of static pressure at fan's exit under different kinetic mechanisms

移动外罩后移,风扇出口排气面积由单一的外涵喷管排气面积变为外涵喷管排气面积与叶栅排气面积之和,在阻流门未转动时,外涵喷管排气面积基本保持不变,增加叶栅通道排气面积后,通过风扇流量应增加,出口静压应降低,但在图 7 中在运动时间较短时(对应移动外罩后移距离小于 50 mm)静压值增加在于:当移动外罩后移距离较小时,如图 7 所示,叶栅通道不但未排气,外界气流反而因引射作用,通过叶栅通道进入外涵通道并产生回流区,使风扇出口有效排气面积减少,从而导致通过风扇的流量降低、出口静压升高的现象。

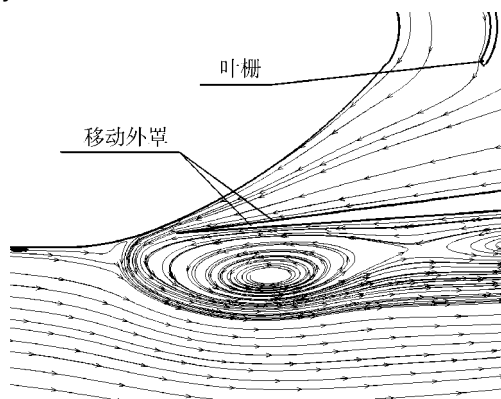


图 7 移动外罩小距离移动时局部流线示意图

Fig. 7 Local streamline graph under small distance of translating cowl

在运动规律 1 作用下,反推力装置打开过程中风扇出口静压明显升高,风扇工作点向喘振边界靠拢,对风扇外涵喘振裕度较小的发动机,使用此运动规律时,可能导致发动机风扇喘振。

在运动规律 2 的基础上仅增加了对作动筒的起动与终止缓冲的考虑,设计了运动规律 3,所以运动规律 2,3 对风扇性能影响基本相同。运动规律 3 为叶栅通道打开一半以前,阻流门只平移,保持外涵喷管排气面积基本不变,之后阻流门快速转动关闭外涵通道。在此类运动规律下,反推力装置打开过程中风扇出口有效排气面积(平移距离大于 50 mm 后)大于正推力状态下有效排气面积,导致通过风扇气流流量增加(除移动外罩打开初始时因引射而引起的通过风扇流量减少外),风扇出口截面静压低于正推力状态时静压,风扇工作点远离喘振边界。虽然使用此类运动规律使发动机工作点远离喘振边界,但风扇工作点短时间远离风扇工作线,容易对风扇产生冲击。

运动规律 4 使风扇出口截面静压相对变化量减少,对于风扇外涵喘振裕度较大的发动机,反推力装置使用此类运动规律可使风扇在反推力装置打开过程中平稳工作。

综上所述,反推力装置打开时,应先打开叶栅通道一定面积,再开始堵塞外涵通道。运动规律 3 比较适合于风扇外涵喘振裕度较小的发动机,虽然使风扇出口静压降低较大,但反推力装置在打开过程中均使风扇出口有效面积增大(除刚起动时因引射气流而导致有效排气面积减少外),风扇工作点远离喘振边界。运动规律 4 比较适合于风扇外涵喘振裕度较大的发动机,此规律使风扇出口有效面积在反推力装置打开过程中变化较小,风扇工作较稳定。

3.2 反推力装置打开过程阻流门气动载荷分析

图 8 为反推力装置打开过程使用运动规律 3,4 时阻流门内外表面静压变化,由该图可知,在反推力装置未打开时,阻流门内外表面静压基本相同,拉杆在发动机正推力状态下只需支撑阻流门质量。移动外罩向后平移而阻流门未转动过程中,阻流门上下表面静压变化趋势基本相同,而当阻流门开始转动时,内表面静压快速升高,然后维持不变,外表面静压则急剧降低,然后有所回升,再保持稳定。

图 9 为反推力装置使用运动规律 3,4 打开过程中阻流门内外表面平均静压之差(内表面与外表面之差)。由该图可知,阻流门未转动时,两个表

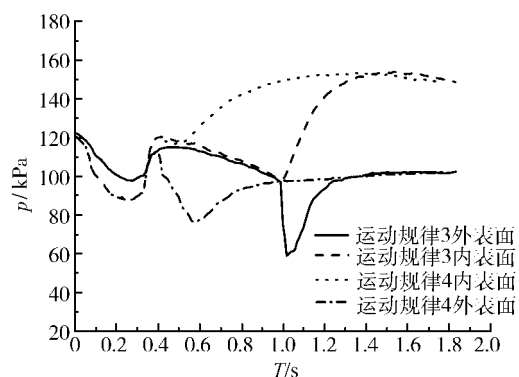


图8 运动规律3、4阻流门内外表面静压变化

Fig.8 Static pressure distribution on inner and outer surface of blocker door under different kinetic mechanisms

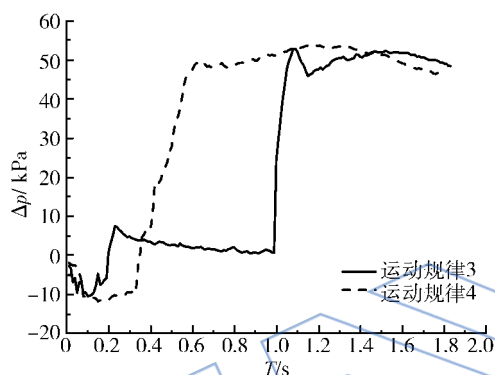


图9 不同运动规律下阻流门内外表面平均静压之差

Fig.9 Difference of mean static pressure between blocker door's inner and outer surface under different kinetic mechanisms

面压差非常小,而在阻流门刚开始转动瞬间(运动规律3中约为0.15s,运动规律4中约为0.2s)内外表面压差急剧升高,然后保持在50kPa左右不变.从图1中可以看出,拉杆对于阻流门A点的转动力臂在反推力状态最大,阻流门未转时最小.而作用于阻流门上的气动力矩(作用力大小基本保持50kPa不变,方向始终垂直阻流门,作用力臂保持不变)基本保持不变,所以,阻流门拉杆在阻流门刚开始转时受力最大.

4 结 论

本文计算了反推力装置打开过程中移动外罩及阻流门使用不同运动规律对风扇出口静压的影响及阻流门所受气动载荷的变化情况.得出的主

要结论如下:

1) 移动外罩及阻流门运动规律直接影响反推力装置打开/关闭过程中风扇工作点位置.运动规律3较适合风扇外涵喘振裕度较小发动机的反推力装置选用,而运动规律4较适合外涵喘振裕度较大发动机的反推力装置选用.

2) 反推力装置打开过程中,阻流门所受气动载荷在阻流门开始转动瞬间加载,然后保持基本不变,拉杆强度设计时应考虑打开过程.

参考文献:

- [1] Yetter J A. Why do airlines want and use thrust reversers? A compilation of airline industry responses to a survey regarding the use of thrust reversers on commercial transport airplanes[R]. NASA TM-109158, 1995.
- [2] 陈光. 航空燃气涡轮发动机结构设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1987.
- [3] 刘长福. 航空发动机构造[M]. 北京:国防工业出版社,1989.
- [4] 刘大响. 航空发动机设计手册:第7册[M]. 北京:航空工业出版社,2000.
- [5] Jackson J. Development of the boeing 767 thrust reverser[R]. AIAA-86-1536,1986.
- [6] Dietrich D A, Gutierrez O A. Performance of a model cascade thrust reverser for shorthaul applications[R]. AIAA-74-1171,1974.
- [7] Chuck C, Hsiao E, Colehour J, et al. Navier-Stokes calculations of under wing turbofan nacelles[R]. AIAA-98-2734,1998.
- [8] Johus C J. Solution of an engine inlet compatibility problem during C-17 low cost N/EA T nacelle thrust reverser development[R]. AIAA-2000-01-5579,2000.
- [9] 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[C]//中国航空学会2007年学术年会论文集. 深圳:中国航空学会,2007.
- [10] 杜刚,金捷. 大型运输机发动机反推力装置[C]//中国航空学会2007年学术年会论文集. 深圳:中国航空学会,2007.
- [11] 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):48-58.
- JIN Baolin, XING Weihong, LIU Dianchun. Thrust reversers of aircraft/engine propulsion system[J]. Aero-engine, 2004(30):48-58. (in Chinese)
- [12] Rolls Royce Aerospace Group. The jet engine[M]. Birmingham, England: GH Graphics Ltd., 1996.
- [13] Trapp L G, Oliveira G L. Aircraft thrust reverser cascade configuration evaluation through CFD[R]. AIAA 2003-723,2003.