

民用飞机反推力格栅出流 模式设计与试验

Design and Test of Cascade Efflux-pattern for Civil Aircraft Thrust Reversers

胡仞与 张冬云 / Hu Renyu Zhang dongyun

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

通过给定各块格栅上气流的折流角,反推力格栅出流模式描述了反推气流方向沿发房周向的分布。出流模式的定义需要考虑使反推系统满足反推效率,重吸入特性和有效面积方面的要求,还应使反推气流对机体气动特性的影响最小化。格栅出流模式设计是否满足反推效率和有效面积的要求,可由单独反推系统的静态试验来进行验证,而重吸入特性和发动机/飞机气动干扰则必须通过全机反推力风洞试验来进行考察。

关键词:反推力系统;格栅;出流模式

中图分类号:V211.74

文献标识码:A

[Abstract] By defining the deflection angles of exhaust flow on each cascades, efflux-pattern describes the circumferential distribution of the exhaust flow from the thrust reverser around a nacelle. The determination of the efflux pattern must take into account the requirements for efficiency, re-ingestion characteristics and effective area, as well as the impact imposed by the exhaust flow on the aircraft aerodynamic characteristics. Whether or not certain efflux design provides sufficient thrust efficiency and effective area can be evaluated by separate thrust reverser static test while re-ingestion characteristics and engine/aircraft aerodynamic interference can only be studied in an installed wind tunnel test.

[Key words] thrust reverser; cascade; efflux-pattern

0 引言

现代民机在着陆滑跑或者中止起飞时,常利用发动机的反推力系统将部分发动机推力转化为制动力,来减小飞机在跑道上,尤其是在湿滑跑道上的滑跑距离,提高飞机运行的安全性。涡扇发动机上常见的反推力系统有抓斗式反推力系统(Bucket-type thrust reverser)、瓣式折流门反推力系统(Clamshell door thrust reverser)和格栅式反推力系统(Cascade thrust reverser),其中格栅式反推力系统(如图1所示)由于能够精确地控制反推气流的方向,是当今最主流的反推力系统形式,被广泛地应用于各种型号的大涵道比涡扇发动机上。



图1 格栅式反推力系统

格栅式反推力系统的特点是在反推力系统打开后,外涵上将出现一组沿周向布置的格栅零件(Cascade)。如图2所示,每一块格栅上都有一系列外形相同的导流叶片,这些导流叶片将外涵气流折向前方,产生反推力。通过调整每块格栅上的导流

叶片设计,就能够对周向上不同位置处的反推气流的方向进行控制,使其既能够产生所需的制动效果,又不影响飞机和发动机的安全运行。

格栅设计时,一般先由飞机/发动机气动集成专业的工程师定义满足设计要求的沿发房周向的反推气流方向分布,即出流模式(efflux-pattern);再由专门设计格栅导流叶片的工程师来设计能实现所需出流模式的格栅叶片。由于涉及到飞机和发动机两方面的限制和要求,出流模式是格栅气动设计的难点所在,通常需要经过多轮的迭代。图3给出了某尾吊发动机的反推气流出流模式示意图。

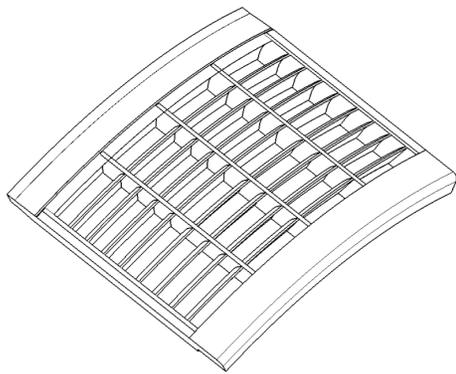


图2 典型的反推力格栅零件

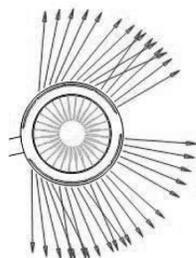


图3 某尾吊发动机的反推格栅出流模式

1 反推力格栅出流模式的定义

反推力格栅的出流模式由各块格栅上的反推气流方向决定。而每块格栅上的气流方向则可以通过两个角度来描述:轴向折流角 β 和周向折流角 α 。如图4所示,这两个折流角的定义是建立在格栅当地坐标系 XYZ 上的。坐标系 XYZ 中的 X 轴与发动机中心轴重合,而 Z 轴则与指向格栅所在周向位置的半径重合, Y 轴与其它两轴成右手系。轴向折流角 β 是气流方向在 XOZ 平面上的投影与 Z 轴的夹角,其描述了反推气流向前偏转产生反推力的程度。周向折流角 α 是气流方向在 YOZ 平面上的投影与 Z 轴的夹角,其作用是控制反推气流在发动

机周向上的分布,避免反推气流直接击中地面引起重吸入和异物吸入,或者击中机身等机体部件,引起气动干扰和冲击载荷。一般来说,在发动机周向不同位置处的格栅有不同的轴向折流角 β 和周向折流角 α ,以实现反推气流的精确控制,满足各种设计要求。因此格栅出流模式实际上是通过一组轴向折流角 β 和周向折流角 α 来定义的。

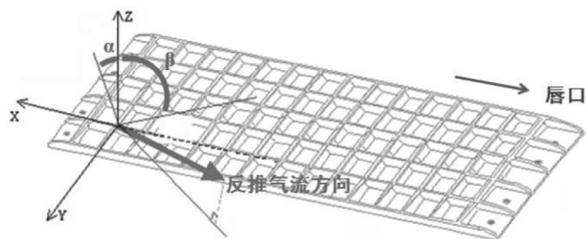


图4 格栅折流角的定义

2 反推力格栅气动设计要求及其对出流模式设计的影响

反推力格栅作为发动机反推力系统中的一个重要部件,不仅决定系统的功效,还能对发动机的安全运行产生影响。因此格栅的设计,尤其是出流模式的设计需要满足多个相互制约的设计要求。主要的设计要求可以归结为以下3个方面。

(1) 反推效率

为保证反推系统能够将发动机功率有效地转换为反推制动力,减小飞机的滑跑距离,反推格栅出流模式的设计必须保证反推系统的效率。反推效率 η 一般定义为在同样的功率下,反推构型下外涵产生的推力与正推构型下外涵产生的推力之比,即

$$\eta = T_{\text{fan reversed}} / T_{\text{fan forward}} \quad (1)$$

反推效率越高,则为达到一定的反推力指标所需的发动机功率越低,有助于降低反推开启时的噪声和油耗。现代民机的反推效率一般在40%左右。

为提高反推效率,从格栅上出来的反推气流应尽可能的折向前方,这需要尽可能大的轴向折流角 β 。考虑到降低格栅叶片设计的难度,轴向折流角 β 一般不超过 45° 。

(2) 重吸入特性

随着飞机滑跑速度的不断降低,前方来流对反推气流的抑制作用将逐渐减弱,反推气流向前运动的行程则不断变大。当速度减小到一定程度,将出现高温的反推气流被发动机重新吸入而影响发动机运行安全性的问题。由于反推系统必须在发动

机出现明显的重吸入前关闭,因此重吸入特性将决定反推系统的可用速度范围和时间,从而影响滑跑距离。改善重吸入特性首先需要限制反推气流的轴向折流角 β ,因为气流向前偏折的程度越大,则向前运动的能量越大,越容易进入发动机的进气流场。对于下单翼且翼吊布局的民机,引起重吸入的反推气流多来自于位于发房内侧(近机身一侧)下半部的格栅,因此设计时需对这些格栅上的气流轴向折流角 β 有严格的控制。其次,周向折流角 α 的布置,也会影响重吸入特性。重吸入通常因为反推气流直接击中地面或机身后发生反弹进入进气流场而产生。因此对于发房底部和内侧靠近机身处的格栅,设计时应使其能够产生足够大的周向折流角 α ,以引导反推气流避开地面和机身。

(3) 有效面积

正推力状态时,发动机外涵喷口的面积决定风扇系统的运行线(流量-增压比曲线)在风扇包线图上的位置,如图5所示,喷口面积越大,运行线离喘振边界越远。同样,在反推力状态下,出于运行安全性考虑,应使风扇系统的运行线远离喘振边界。现代民机反推系统的运行线在风扇包线图上的位置往往比正推运行线略低,如图5中的典型正推运行线A3和反推运行线a3的相对位置所示。这要求在一定的增压比下,反推外涵应有更大的流量。

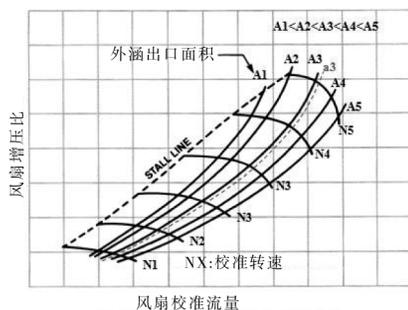


图5 风扇包线图

反推系统打开后,外涵总流量由两部分组成:经过格栅的反推气流的流量和经过外涵喷管向后排出的流量。由于反推气流的流量占总流量的80%以上,因此格栅设计是否满足一定的流量要求,将在很大程度上决定发动机能否安全运行。在给定发动机功率的情况下,反推气流的流量取决于格栅的有效面积。有效面积等于物理面积与流量系数之积,反映了气流经过格栅时的能量损失。一般来说,格栅产生的折流效果越大,气流的能量损失

越大,有效面积越小。因此从提高格栅有效面积的角度来说,应对格栅上气流的折流角的最大值有所限制,同时尽量避免在一块格栅上同时有较大的轴向折流角和较大的周向折流角。

除以上3个方面的要求外,设计格栅出流模式时,还应尽量降低反推气流对机体气动特性的影响,避免或减小从格栅排出的反推气流对机体部件的冲击和覆盖。

3 试验验证

完成反推系统的设计后,为减少全尺寸发动机试验和飞行试验的工作量,降低研发成本和风险,需要进行缩比模型的地面验证试验。针对反推力格栅气动设计进行验证的缩比模型试验主要可以分为两类:单独反推系统的静态试验和全机反推力风洞试验。

(1) 单独反推系统的静态试验

单独反推系统的静态试验通常由动力装置供应商(反推系统的设计者)负责进行,试验使用的模型需能够准确反映位于风扇后的反推系统的各种细节,如外涵喷管,格栅和反推阻挡门(blocker doors)等。试验模型不但要能够模拟完全开启的反推系统,还需模拟反推系统部分打开的状态,以在试验中研究系统的稳态和瞬态特性。风扇气流由外部气源通过连接于外涵的管路提供,试验中无外流存在,仅模拟静态情况下反推系统的运行。单独反推系统试验的目的是获得反推系统的反推效率和有效面积,从动力装置运行特性的角度来评估反推力格栅和其他反推系统部件的设计。

(2) 全机反推力风洞试验

反推系统的重吸入特性除了取决于格栅设计外,还受到发动机在飞机上的安装位置和离地高度的影响,因此需要进行如图6所示的全机风洞试验来确定反推系统的重吸入特性。风洞试验中多采用动力模拟器(TPS单元)来模拟发动机进排气效应。该模拟器安装于模拟发动机正反推构型的缩比发房模型中。由于风扇做功的缘故,从格栅排出的反推气流的总温高于来流,因此试验中通过在发房进气道内安装总温传感器来识别重吸入的发生,并确定重吸入开始出现的速度。图7给出了一个典型的安装总温传感器的带动力发房照片。

(下转第87页)

6 结论

并行工程在商用飞机研发项目中实施需要做的工作还有很多,本文只是从一个侧面把并行工程的理念和实施方法做了顶层建议。使用并行工程的企业由于组织架构、工作习惯和产品特点等的不同在具体实施时都会遇到不同的问题,而很多企业仅仅在原有组织架构基础上再增加新的体系以期实现并行工程的应用。虽然短期上看,可以从形式上体现新的理念,但要注意避免项目团队同时遵守两种体系的规定时无形中增加的工作量,以及相应造成的效率低下的情形。并行工程方法的使用可以缩短商用飞机研制项目的研制周期并降低研制经费。虽然无论在哪种组织结构中都可以使用并行工程,但要使并行工程理念更好地服务于商用

(上接第 53 页)



图 6 全机反推力风洞试验



图 7 安装总温传感器的带动力发房

全机风洞试验中的另一个关注点是反推气流对全机气动特性的影响。由于从格栅出来的反推气流挡住了来流,在其后形成一个动压很低的低能区域,处于该区域内的机体部件的阻力和控制面,如扰流板和方向舵的效率将有明显降低。这些不利影响可能部分抵消反推系统的制动效果,有时甚至导致格栅设计方案的更改。因此全机反推力风洞试验为从发动机/飞机气动干扰的角度评估反推力格栅设计创造了条件。风洞试验中为获得反推气流对机体特性的影

飞机设计项目,在企业原有的组织模式和成功经验的基础上量身定做,兼容并蓄的改革方案才能走得更稳,走得更远、更有成效。

参考文献:

- [1] (美)项目管理协会著,王勇,张斌译. 项目管理知识体系指南[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [2] 耿汝光. 大型复杂航空产品项目管理[M]. 北京:航空工业出版社,2012.
- [3] 朱一凡,李群等译. NASA 系统工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [4] (德)汉斯-亨利奇. 阿尔特菲尔德著. 商用飞机项目——复杂高端产品的研发管理[M]. 北京:航空工业出版社,2013.

响量,需在实测数据中扣除反推力,因此在正式开始前,会选择一个较小的风洞中对正反推构型的带动力发房的推力进行校准。

4 结论

反推力格栅出流模式设计实质上是定义各块格栅上气流的轴向折流角 β 和周向折流角 α ,折流角的选择需要同时考虑反推效率、重吸入特性以及有效面积方面的要求,还要兼顾反推气流对飞机气动特性的影响。这些设计要求对格栅出流模式的要求通常互相矛盾,需要综合考虑。为降低研发风险,完成格栅出流模式设计后,需要进行验证性试验,包括单独反推系统的静态试验和全机反推力风洞试验。单独反推系统试验主要从动力装置运行特性的角度考察格栅设计方案是否满足设计要求,例如反推效率和有效面积方面的要求,而全机风洞试验则为研究安装后的发动机重吸入特性和发动机/飞机的气动干扰提供了条件。

参考文献:

- [1] Burgsmuller W, Castan C, Hoheisel H, Kooi J W. Preparation and use of TPS-Technique for low speed investigations on transport aircraft[R]. International Forum on Turbine Powered Simulation, 1995.
- [2] OBERT E. Aerodynamic design of transport aircraft[M]. Publish by IOS Press under the imprint Delft University Press.