

S形进气道和发动机相容性*

杨 国 才

(华西机械自动化研究所, 成都, 610041)

摘 要: 进气道旋流是进/发相容性的一个重大扰动参数。在发动机稳定性和性能方面进气道旋流的效应也是不可忽视的。讨论了S形进气道/发动机相容性的评定方法, 并且建议了有效评定准则。S形进气道/发动机相容性评定必须由两部分组成, 一部分与压力畸变有关, 而另一部分与流动弯曲度有关。

主题词: 进气道, 旋涡, 流场, 匹配, 相容性, 评价方法

分类号: V211.48

ENGINE/S-SHAPED-INLET COMPATIBILITY

Yang Guocai

(Hua Xi Inst. of Machine Automation, Chengdu, 610041)

Abstract: Inlet Swirl is a major disturbance parameter in engine/inlet compatibility. Its effects should not be ignored. The procedure for assessment of engine/S-shaped-inlet compatibility is discussed, and a criterion for its validity is suggested. The criterion for engine /S-shaped-inlet compatibility must consist of two parts, one is related with pressure distortion and another with flow angularity.

Subject terms: Inlet, Swirl, Flow field, Matching, Compatibility, Assessment method

1 引 言

现有格斗飞机超音速进气道出口基本上都产生旋流, 带非遮蔽的有S弯扩散段的常规进气道更是如此; 所有现代的军用发动机几乎对旋流扰动都有不同程度的敏感, 进口不带导向叶片的发动机尤为敏感; 旋流是进/发相容性的一个重大扰动参数, 于是出现了所谓的“S形进气道旋流问题”。旋流是70年代才发现并被重视的出现在第三代战斗机S形超音速常规进气道内的一种三元涡旋流动的现象。其对发动机性能和稳定性的不利影响是众所周知的。

* 本文1994年9月29日收到

旋流对进/发匹配的重大不利影响,应该引起在研机种型号飞机设计师们的真正重视,值得深入研究。本文围绕某S形进气道与发动机相容性问题以及相容性的评定,浅谈几点个人看法。

2 进气道旋流问题不容忽视

进气道旋流是进/发相容性的一个重大扰动参数^[1]。当今国际上研究进气道与发动机相容性的新趋势,是对进/发气动力界面上特定的相容性参数(如压力畸变、温度畸变、紊流度和旋流)进行检查^[2],并且国外的研究论文一再强调,进气道旋流是较新而重要的相容性参数。这一点,对进口无导向叶片(IGV)的发动机更为重要,这是因为进口不带IGV的发动机对旋流扰动特别敏感。

常规的二元腹部S形进气道旋流的产生,对飞行侧滑角 β 的变化很敏感。早在1985年开展的两期进气道旋流试验研究完全证明了这一点^[3]。业已发现,该进气道在 $\beta \geq -6^\circ$ 时会产生与发动机转动反向的整涡(不是纯单涡)旋流;在 $\beta \geq 6^\circ$ 时则会产生同向整涡旋流,其最大旋流角达 5° ,平均旋流角在 2.5° 以上,也就是说,已达到了可能导致RB-199高性能涡扇发动机喘振和强迫叶片振动的程度。

诚然,与之组合的某发动机进口带有23片可变弯度的IGV,似有一定的抗旋流能力。但是据分析,该进口处的IGV,主要还是针对低压压气机喘振裕度较小(换算转速 $N_{imp}=92\% \sim 98\%$,在均匀进口流场下,喘振裕度 $\Delta K_c=15\%$;允许的进气畸变,周向、径向综合为 15% ——称为“两个 15% ”),为使其具备有一定的抗进气畸变能力而设置的,其IGV可调部分的角度控制,按风扇换算转速 N_{imp} 自动调节;但其设计并未对旋流扰动的出现做出响应。究其因是某原装的直通式进气道本没有产生旋流,因而也不必提示旋流的不利影响。因此,对于发动机是否能抗得住附加平均旋流角 2.5° 以上反向旋流扰动,目前还说不清楚。

一般认为,常规S形腹部进气道/发动机的组合存在旋流隐患。即使不导致发动机喘振,但由于反向旋流扰动,它也会加大流场畸变程度,会“吃掉”压气机的部分喘振裕度,引起性能降低,对稳定工作不利则是肯定的。同向旋流的出现,则会降低发动机推力。可见,旋流扰动大大地减小了发动机的工作稳定性,从而降低了飞机的机动飞行能力。

事实上,任何发动机对进气旋流都有不同程度的敏感,“只要局部反向转动的旋流足够大,并延续到压气机前的适当的扇面内,任何单涡和对涡的组合都将引起喘振”^[4]。因此,旋流试验“不仅对无IGV发动机的研制是必要的(如RB-199发动机),而且对有IGV的未来发动机计划也是必要的”。

总之,单发飞机有自己的特殊性,必需考虑反向旋流对发动机的重大干扰问题。考虑到旋流扰动对单发飞机完全的危害要比对双发飞机的危害严重,因此,旋流问题应引起关注。

3 相容性评定标准

进气道与发动机相容性评定,俄国人不采用西方的评定标准,而有一套自己现行的俄国经验标准。他们提出,以6点压力脉动分量RMS值 ϵ 加上30点稳态压力畸变指数值 $\Delta\bar{\sigma}_0$,作为瞬时总压畸变指数 W 值,并且以 $W=\Delta\bar{\sigma}_0+\epsilon<9\%$ 为检查进气道与发动机相容性评定指标。

尽管 $\Delta\sigma_0$ 的数值计算处理方法与西方人的某资料雷同^[6], 但以 W 为标准值得商榷。

S形进气道出口流场畸变, 不仅有表征为压力场畸变的问题, 而且有表征为方向场与压力场畸变综合的问题。尤其是后一种工况的出现, 反向旋流扰动, 很可能上升为影响进/发流场匹配的决定性参数, 西欧三国联合研制的 TORNADO 飞机便是其中一典型事例。

因此, 沿用只考虑总压畸变的综合法来检查进/发相容性, 而不考虑方向场畸变, 其本身就显得不够充分。其实, 以 W 为标准在概念上也是模糊的, 因为它把本来复杂的三元气流速度场畸变, 当作简单的一元气流压力场畸变, 不仅混淆了流态概念, 而且也无法解释旋流现象的生成, 无法解释相伴而生的 S 形进气道出口静压场畸变。

至于评定指标 $W < 9\%$ 是否合适, 作者认为仍有商榷之处, 理由如下:

(1) 众所周知, 同一型号的发动机, 在不同飞机上的使用场合有很大差异。在飞机气动总体设计上, Su-27 采用双发进气布局, 其两条直通式进气道分别“附着”在两侧机翼翼根处的下方, 且机翼有较大的前边条, 而另一不同飞机采用 F-16 式的单发腹部 S 形进气布局。尽管两型号都采用二元带可调斜板外压式进气道, 但在进气道气动设计上也大不相同。

(2) S 形进气道与发动机的组合, 在推进风洞中进/发联试无数据可考。因此, 谁能说发动机失稳必然要发生在 $W = 9\%$ 之上? 给出此数据有何依据? 因而其置信度较差。

至关重要的是发动机的使用场合变了, S 形进气道又出现了旋流, 而旋流扰动与压力畸变对相容性不利影响的作用机理又不相同, 旋流扰动的不利影响要比压力畸变严重得多^[2]。因此, 不论 W 取值多少, 置旋流于不顾, 只采用一元的总压畸变综合指数 W 为评定指标是不够妥当的。

4 结论与建议

综上所述, 可以得出以下结论:

S 形进/发相容性评定方法, 与该 S 形进气道有反向旋流有直接关系。该进气道出口流场必须根据该气动力界面上的局部马赫数、总压和流动弯曲度来定义。因此, 旋流评定需再加上少量的动态压力测量的方法。不管人们的主观愿望如何, 在 S 形进气道/发动机相容性试验中, 发动机都必将受到旋流扰动的考验, 而其进气道也必将受到较为苛刻的发动机的“两个 15%”进气流场品质的挑战。不同型号飞机的进/发相容性评定指标是不可以生搬硬套的。

如何解决好进/发相容性问题, 相信将成为人们关注的一个技术焦点。为此, 提出以下三点具体建议:

(1) 必须立足国内解决问题

虽然, 前苏联的相容性评定方法较为简单, 但他们毕竟发展了一系列不逊色于欧美国家的机动飞机。Su-27 飞机可谓其一代表之作, 从发动机研制到进气道设计以及进/发相容性评定, 已形成了一整套以实践经验为基础的型号研制做法, 这是值得我们学习与深入了解的。

摆在人们面前的课题, 是如何把欧美及前苏联的做法综合起来, 再加上我们自己的实践和国内各方面条件, 提出较为切实可行、符合国情的一些相容性评定方法。

(2) 欧美先进技术发展道路值得借鉴

从飞机成品仿制到自行研制, 从改型到创新, 其中都有一个从量变到质变的飞跃的过渡过程。由于工业技术基础较差, 目前我们尚不具备俄罗斯那样研制飞机的丰富经验, 也不可

能象俄国人那样采用简单的进/发地面静止状况试车兼丰富的试飞经验来行事。在中国自己的相容性评定方法出台之前,走试飞风险小,成功概率较大的技术发展之路是适当的。事实上,自60年代以来我国沿着这条道路发展,已取得了一定的成功,例如借鉴美国1978年出版的ARP-1420及1983年出版的AIR-1419技术指南,在真实进气条件下考验发动机在进气畸变工况下的工作稳定性、可靠性和结构完整性。只有这样科学、严格的考核,才能把试飞中的进/发相容性风险降低到最小程度。

对于发动机而言,主要是根据飞机型号单位提供的进气道出口平面典型的总压场、方向场图谱,开展流场模拟发生器的研制工作,先地面后上天地开展发动机对进气畸变(包括旋流扰动)的响应试验,摸清发动机对进气畸变的敏感度及容忍旋流扰动的能力极限。只有这样,才能做到“有的放矢”和“心中有数”地解决进/发流场匹配问题。

(3) 相容性评定方法推荐

S形进/发相容性评定方法,必须考虑旋流(方向场测量)与简化压力畸变综合法(少量的动态测量)相结合的方法,也就是说,必须采用压力畸变指数,同时还必须采用旋流指数这样的双重评定指标。

根据国内旋流研究的现状和国外公开发表的资料,认为较为成熟的指数可采用TORNA-DO飞机现成的 $\bar{\tau}_{87}$ 。其定义是在进气道出口平面的 $R=0.87R_{\max}$ 处的周向(即横向)流动角平均值。它可以表征旋流的大小与方向,也即代表了旋流强度。

于是,本文推荐给S形进/发流场的匹配的条件是:

$$\begin{cases} W < a \\ \bar{\tau}_{87} < b \end{cases}$$

式中 a 与 b 值应由进口带有压力畸变及旋流模拟器的发动机地面台架试验来确定。以上 a 、 b 两个指标都应该满足,缺一不可,否则将被视为相容性评定不完善。

参 考 文 献

- [1] Aulehla F. Intake Swirl—a Major Disturbance Parameter in Engine/Intake Compatibility. ICAS-82-4.8.1
- [2] 航空航天工业部624所. 国外飞机进气道/发动机相容性评审方法. 航空航天部624所, 1990
- [3] 杨国才, 郑 遂. S弯进气道旋流研究. 推进技术, 1992 (1)
- [4] Aulehla F, Schmitz D M. New Trends in Intake/Engine Compatibility Assessment. N87-24467
- [5] Genssler H P, Meyer W, Pottner L. Development of Intake Swirl Generators for Turbo Jet Engine Testing. N87-24480
- [6] Collins T P. Engine Stability Considerations. (The Aerothermodynamics of Aircraft Gas Turbine Engines). AD-A059 784
- [7] 杨国才. 在流场匹配方面进气道反旋流措施的工程应用研究. 推进技术, 1994 (4)