

外部扰动影响下风扇和压气机稳定裕度的计算方法^{*}

李小彪, 张振家

(航天机电集团公司 31 所, 北京 100074)

摘 要: 为了定量评定燃气涡轮发动机的风扇和压气机的气动稳定性, 分析了影响风扇和压气机稳定性的外部扰动参数, 介绍了工程中计算气动扰动和热扰动对风扇和压气机的影响所采用的标准型扰动, 给出了在外部气动扰动和热扰动作用下的风扇和压气机的稳定裕度变化的一种计算方法, 可供工程研制中参考。

关键词: 燃气涡轮发动机; 风扇; 压气机; 气动稳定性; 稳定性计算

中图分类号: V235.113 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2001) 06-0483-03

Calculation method for the fan and compressor surge margin in the effect of outside-flow disturb

LI Xiaobiao, ZHANG Zhenjia

(The 31st Research Inst., Beijing 100074, China)

Abstract: In order to assess pneumatic stability of fan or compressor in gas turbine engine, the pneumatic stability parameters were analyzed. Described standard pneumatic disturb and heat disturb used in engineering. A calculation method which can be referenced in engineering for the fan and compressor pneumatic stability in the effect of outside-flow disturb was given out.

Key words: Gas turbine engine; Fan; Air compressor; Aerodynamic stability; Stability calculation.

1 引 言

航空发动机稳定性评定是一极为重要的课题。加大固有稳定性则明显牺牲发动机的性能, 固有稳定性不足则不能补偿外界扰动对风扇和压气机的影响, 导致发动机在实际工作环境不能正常稳定地工作。因此, 对特定对象的发动机, 分析其在实际工作环境条件下的外部扰动, 进而分析这些外部扰动对风扇和压气机稳定性的影响是非常关键的, 也是非常困难的。

为了定量评定发动机及其部件的气动稳定性, 可以使用定量表征在一定工作状态下该级风扇或者压气机在发动机系统中具有的稳定裕度、所需要的总裕度、以及补偿各使用因素的局部需用稳定裕度等参数, 包括: (1) 在给定使用条件和工作状态下该级风扇或压气机的可用稳定裕度 SMC_{ky} ; (2) 无外部扰动时, 在 $Ma = 0$ 、 $H = 0$ 条件下在用工艺进气道的试车台

上, 该风扇或压气机的设计可用稳定裕度 SMC_0 ; (3) 在给定使用条件下, 补偿对风扇或压气机工作点位置影响的局部需用稳定裕度 SMC_{xy} ; (4) 在给定使用条件下, 该风扇或压气机的总需用稳定裕度 SMC_{xy} ; (5) 补偿单独 I 因素影响的局部需用稳定裕度 SMC_{xyI} 。

国内外在喘振机理、喘振的数值模拟研究和试验研究、防喘控制等方面虽都取得了大量的成果, 也进行了外部扰动作用下发动机稳定性变化的研究^[1~7]。但是, 如何在工程上定量计算出外部扰动影响下风扇和压气机稳定裕度的变化值, 判定发动机在给定的外部扰动条件下能否正常工作的问题, 仍然需要深入研究。

2 外部扰动参数分析

在发动机的使用过程中, 对风扇或压气机所受外部扰动, 工程上可用气动扰动参数、热扰动参数和阶跃式总压等熵扰动参数进行分析。

^{*} 收稿日期: 2001-04-18; 修订日期: 2001-06-12。

作者简介: 李小彪 (1964—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究领域为航空发动机总体性能。

2.1 气动扰动参数

(1) 定常周向不均匀度 $\Delta\bar{\alpha}_0$

$$\Delta\bar{\alpha}_0 = 1 - \frac{\frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (p^*(\varphi) d\varphi)_{p^*(\varphi) \leq p^*}}{p^*}$$

式中, $p^*(\varphi)$ 为总压沿周向坐标 φ 的时间平均和径向平均总压; $p^* = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p^*(\varphi) d\varphi$ 是整个截面的平均压力。

(2) 沿截面平均的脉动强度 ε_{CP}

$$\varepsilon(\varphi) = \frac{\sqrt{\lim \left[\frac{1}{T} \int_0^T (p^*(t, \varphi) - p^*(\varphi))^2 dt \right]}}{p^*(\varphi)}$$

$$\varepsilon_{CP} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \varepsilon(\varphi) d\varphi$$

(3) 脉动的积分时标 τ_E

$$\tau_E = \int_0^{\infty} \bar{R}(\tau) d\tau$$

式中, $\bar{R}(\tau)$ 为自相关函数。

(4) 脉动的切向(空间)尺度 $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = \int_0^{2\pi} \bar{R}_{XY}(0, \varphi) d\varphi$$

式中, $\bar{R}_{XY}(\tau, \varphi)$ 为相隔 φ 角的点上脉动互相关函数。

(5) 总不均匀度值 W

$$W = \Delta\bar{\alpha}_0 + \varepsilon_{CP}$$

2.2 热扰动参数

(1) 进口截面上空气平均加温

$$\delta T^* = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T^*(\varphi) d\varphi}{T_0^*} - 1$$

式中, T_0^* 为均匀气流的初始温度。

(2) 温度的不均匀度 ΔT_0^*

$$\Delta T_0^* = \frac{\frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (T^*(\varphi) d\varphi)_{T^*(\varphi) > T_0^*}}{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T^*(\varphi) d\varphi} - 1$$

(3) 高温区范围由截面上 $T^*(\varphi) > T_0^*$ 区的切向长度来确定。

2.3 阶跃式总压等熵扰动参数

阶跃式总压等熵扰动的参数为扰动强度 δp 、压缩段持续时间 τ_1 、负压段持续时间 τ_2 。

3 标准型扰动

为了在工程设计阶段计算气动扰动和热扰动的

影响, 采用如下标准型扰动:

(1) 压力下降区幅度为 180° 的直角定常总压不均匀度。以相对起始压力的偏差值给出不均匀度, 这样, 沿周向的平均总压不变。即: $\Delta\sigma = \delta p_{\max}$, 式中 $\delta p_{\max}$ 为周向不均匀度型面的幅度。

(2) 周向方向的总压均匀脉动。取 $\varepsilon(\varphi) = \varepsilon_{CP} = \text{const}$, $\tau_E(\varphi) = \tau_E = \text{const}$;

(3) 认为脉动值和固定不均匀度相同, 即 $\varepsilon = \Delta\bar{\alpha}_0$;

(4) 对于进口直径为 1 m 的发动机, 取纵向脉动时标 τ_E 为 X ms。对于其它进口尺寸的发动机, 纵向脉动时标 τ_E 与发动机进口直径成比例;

(5) 在一半横截面($\varphi = 180^\circ$) 中给出总温温升, 上升速率为 $X/(K/s)$, 增加到限定温度 $\Delta\bar{T}_{\max}$ 为止。

为了计算标准型扰动下发动机的特性, 除了考虑发动机进气道的总压恢复系数外, 再增加总压恢复系数数值等于 X 的模拟进气道。

4 影响系数的确定

4.1 影响系数的确定方法

发动机稳定性计算研究的主要目的是得到对风扇和压气机稳定工作裕度的扰动影响系数的计算评估值, 这就要考虑气体系统的真实性能和扰动在发动机进口的变换。因此, 需要建立发动机数学模型。气动扰动和热扰动对双轴涡扇发动机稳定工作裕度的影响系数的评估, 依据是风扇和压气机不同匹配的一系列数值模拟。每一次数值模拟包括:

(1) 建立不同于原始匹配的风扇或压气机的新匹配, 靠采用发动机内部影响, 降低或者增加风扇或者压气机的可用稳定裕度;

(2) 确定风扇或者压气机的可用稳定裕度;

(3) 确定扰动的临界值。

压力不均匀度影响的计算评估, 是在给定的风扇和压气机匹配下逐渐增加总不均匀度 W 值一直到失稳。取发动机还能够保持稳定性的最大总不均匀度 W 值作为稳定性评定准则。在热扰动条件下, 也据此来确定最大允许热扰动值 $\Delta\bar{T}_{\max}^*$ 。

4.2 改变风扇和压气机匹配的方法

为了改变风扇和压气机的匹配, 可改变喷管面积或向风扇和压气机流道中吹气或者从流道中放气, 以影响风扇和压气机工作。

4.3 风扇和压气机稳定裕度对极限扰动的影响系数

4.3.1 进气道总压扰动

进气道总压扰动临界值与该风扇或压气机可用稳定裕度的典型关系见图1。曲线上水平段对应的压气机稳定裕度足够大,此时发动机的稳定性取决于风扇的稳定性。只有在压气机工作线足够高时才能达到A点,此时压气机稳定裕度不够补偿风扇后的扰动。O点是初始工作线。通常,在没有破坏稳定性的其它因素条件下,在设计点上这些压气机都在气动扰动不敏感区内工作。对于风扇和低压压气机,只有在工作线降得很低时,才有可能出现这种现象。计算中必须通过改变工作线位置来确定风扇或者压气机的工作状态区,在该区内降低可用稳定裕度会引起外部扰动极限值相应下降。在工程中,计算或者试验得到几个 $W(SMC_{ky})$ 后,就可以得到图1的曲线、确定A点的位置,并且评估出风扇和压气机稳定裕度

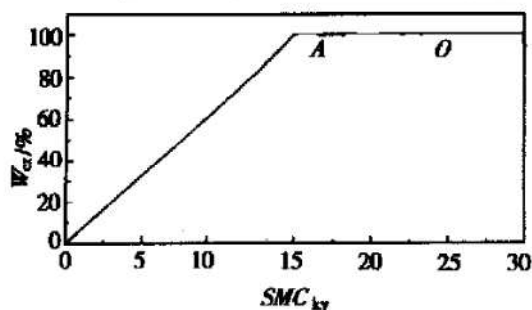


Fig. 1 Typical relationship between W_{cr} and SMC_{ky}

的变化对极限扰动变化的影响系数:

$$\alpha_W = SMC_{ky,A} / W$$

4.3.2 热扰动

对热扰动也进行与总压扰动相同的评估,即求出 $\Delta \bar{T}^* (SMC_{ky})$ 关系曲线,并且评估其影响系数:

$$\alpha_T = SMC_{ky,A} / \Delta \bar{T}^*$$

如果不能发现该风扇或压气机对外部扰动的敏感区,即在更深的节流条件下工作状态仍位于关系曲线 $W(SMC_{ky})$ 和 $\Delta \bar{T}^* (SMC_{ky})$ 的水平段,对应的影响系数认为等于零。一旦工作线上升而导致极限扰动下降,影响系数按原来可用稳定裕度得到。

4.3.3 综合扰动

中等水平定常周向总压不均匀度($\Delta \alpha_0 = 3\% \sim 5\%$)和动态温度不均匀度的相互交叉区大小为 90° ,评估方法与上相同,得到综合影响系数 α_{WT} 。

5 计算用于补偿扰动的局部需用稳定裕度

按照下式计算风扇和压气机补偿外部扰动的局部需用 SMC_{xy} :

$$SMC_{xy} = \alpha_W W_{BX} + \alpha_T \Delta \bar{T}_{BX} + \alpha_{WT} W_{BX} \Delta \bar{T}_{BX}^*$$

式中, W_{BX} 为飞行条件下预期总压不均匀度; $\Delta \bar{T}_{BX}^*$ 为飞行条件下预期总温不均匀度。

根据以上计算及飞行器总体根据发动机工作环境条件给出的 W_{BX} 与 $\Delta \bar{T}_{BX}^*$,就可以计算出风扇和压气机补偿外部扰动的局部需用 SMC_{xy} 。

在得到补偿这些扰动的局部需用裕度 SMC_{xy} 的计算值后,如果 $SMC_{xy} < SMC_{ky}$,则表明发动机有能力在这些给定的外部扰动环境下稳定地工作;如果 $SMC_{xy} > SMC_{ky}$,则需采取措施,否则发动机无法正常工作。

6 结 论

本文介绍的计算方法,可以直接用于弹用涡扇发动机的稳定性评估;可用于进行风扇和压气机可用稳定裕度的计算和分析,为定量评定发动机在外部干扰条件下的正常工作能力提供依据。

参考文献:

- [1] Mahmood Abdel Wahab. Effects of fan inlet temperature disturbances on the stability of a fan engine[R]. NASA TM-82699.
- [2] Braithwaite W M, Graber F J Jr, Mehalic C M. The effect of inlet temperature and pressure distortion on turbojet performance [R]. AIAA 73-1316.
- [3] Longley J P. Measured and predicted of inlet distortion axial compressors[R]. ASME Paper 90-GT-214.
- [4] Hynes Y P, Greitzer, E M. A method for assessing effects of inlet flow distortion on compressor stability[J], ASME Turbomachinery, 1987, 109.
- [5] 王占学,唐狄毅.瞬态过程热传递对压气机稳定裕度的影响[J].推进技术,1997,18(5).
- [6] 吴 虎,廉小纯,陈辅群,等.平面波压力扰动下压气机逐级动态响应分析[J].推进技术,1999,20(6).
- [7] 王立峰,张 津.超机动飞行推进系统稳定性控制研究[J].推进技术,1999,20(6).

(编辑:王居信)