

涡扇发动机部件效率变化对共同工作的影响分析

Analysis of Effect of Component Efficiency Changes on Overall Performance of Turbofan Engine

刘建军 / Liu Jianjun

(中航商用航空发动机有限责任公司, 上海 201108)

(AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

摘要:

以大涵道比涡扇发动机为研究对象,分析了风扇增压级、高压压气机、高压涡轮、低压涡轮和燃烧室部件效率对涡扇发动机共同工作的影响。不同部件效率变化,不同的控制规律对部件的共同工作影响不同,有些参数变化方向相反。

关键词: 涡扇发动机; 部件效率; 共同工作

[Abstract] A high bypass ratio turbofan engine is used as an example, to analyze the influence of major component efficiency changes, including fan, booster, compressor, high pressure turbine, low pressure turbine and combustor, on engine overall performance. It shows that under different control laws, the effects of different component efficiency on engine performance could be different, and even at opposite directions.

[Key words] Turbofan Engine; Efficiency of Components; Engine Performance

0 引言

大涵道比涡扇发动机主要部件由风扇增压级、高压压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮组成。由于加工误差和发动机使用过程中性能的退化,使部件性能会偏离原来的设计值。部件性能对已有的发动机参数影响的热力气动分析,与设计中的发动机不同,部件性能偏离额定值会影响发动机几乎所有部件的共同工作,这些部件特性线上工作点位置及其效率有相应的改变,因此,发动机工作过程参数、所有截面温度和压力、发动机空气流量、单位参数和主要数据都有改变。本文以大涵道比涡扇发动机为研究对象,主要分析了风扇增压级、高压压气机、高压涡轮和低压涡轮部件效率,燃烧室总压恢复系数和完全燃烧系数对涡扇发动机共同工作的影响。

1 高压涡轮和高压压气机效率的影响

(1) 控制规律保证 $n_{2r} = \text{const}$

高压涡轮效率的下降会导致涡轮功减少,这时压气机功大于涡轮功,高压转速有下降的趋势,在调节器保证 $n_{2r} = \text{const}$ 的条件下,为了增大涡轮功,功平衡恢复,燃油流量增大,涡轮前温度升高。这会导致燃气加热比增大,燃烧室和涡轮流通能力降低,高压压气机特性图上的共同工作线向喘振边界移动,稳定工作裕度减小。

由于涡轮前温度升高,低压涡轮功增加,低压转速上升,转差减小,增压级出口流通能力降低,其特性图上共同工作线向喘振边界移动。

发动机的这种参数变化导致发动机空气流量增加,流路所有截面上的压力增加,温度升高,发动机推力增大。推力增大可以用高压转速不变而涡轮前温度升高来解释。

因为高压涡轮工作效率的下降而导致发动机整机工作效率下降,发动机经济性恶化,耗油率增大。

高压压气机效率对部件共同工作和发动机主要参数有类似的影响,高压压气机效率的降低导致

压气机功增加,需要的涡轮功增加,因而导致涡轮前温度升高。

(2)控制规律保证 $n1r = \text{const}$

高压涡轮效率的下降会导致涡轮功减少,这时压气机功大于涡轮功,高压转速下降,低压转速有下降的趋势,在调节器保证 $n1r = \text{const}$ 的条件下,燃油流量增大,涡轮前温度升高。这会导致燃气加热比增大,燃烧室和高压涡轮流通能力减小,高压压气机特性图上的共同工作线靠近喘振边界,稳定工作裕度减小。

由于低压转速不变,高压转速降低,转差减小,增压级出口流通能力降低,其特性图上共同工作线向喘振边界移动。

发动机的这种参数变化导致发动机空气流量不变,发动机推力不变。

虽然燃油流量减小,但推力降低,因为高压涡轮工作效率的下降而导致发动机整机工作效率下降,因此耗油率升高。

高压压气机效率对部件共同工作和发动机主要参数有类似的影响,高压压气机效率的降低导致压气机功增加,高压转速降低,因而导致涡轮前温度降低。

表1为高压涡轮或高压压气机效率降低对发动机主要性能参数的影响趋势。表中低压换算转速 $N1r$,高压换算转速 $N2r$,涡轮前温度 $T4$,燃油流量 Wf ,风扇增压级共同工作线到喘振边界的裕度 ΔSML ,高压压气机共同工作线到喘振边界的裕度 ΔSMH ,推力 F ,耗油率 Sfc 。

采用 Gasturb 软件大涵道比涡扇发动机算例和通用特性,计算了不同控制规律下高压涡轮和高压压气机效率分别降低 2% 时对部件共同工作的影响。计算结果见图1和图2,图中点1(图标为□)控制规律为 $n1r = \text{const}$,点2(图标为▽)控制规律为 $n2r = \text{const}$ 。

表1 高压涡轮或高压压气机效率降低对发动机主要性能参数的影响趋势

控制规律	$N1r$	$N2r$	$T4$	Wf	ΔSML	ΔSMH	F	Sfc
$N1r = c$	→	↓	↑	↑	↓	↓	→	↑
$N2r = c$	↑	→	↑	↑	↓	↓	↑	↑

2 低压涡轮和风扇效率的影响

分析低压涡轮或风扇效率偏离设计值对发动

机参数的影响时,出现的第一个问题是,高压压气机特性图上的共同工作线位置是否改变?回答是不改变。从共同工作方程可以看出,工作线的位置只与核心机工作效率和表征它做功系数有关。核心机内部任意参数的变化如果不影响涡轮落压比(即无核心机功率提取或引气),就不影响工作线位置。

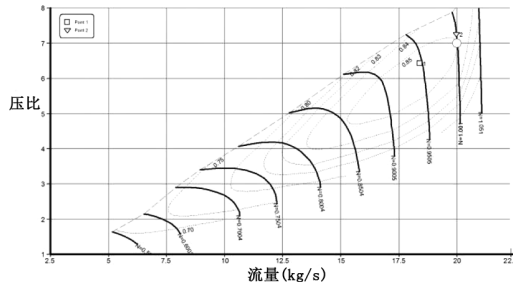


图1 高压涡轮或高压压气机效率降低对高压共同工作的影响

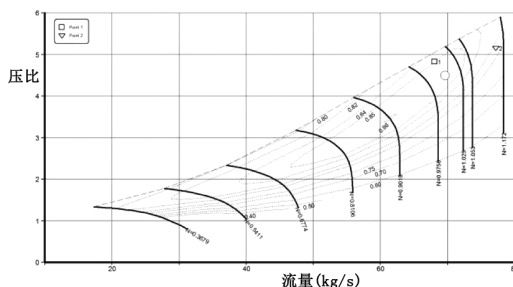


图2 高压涡轮或高压压气机效率降低对低压共同工作的影响

(1)控制规律保证 $n2r = \text{const}$

当高压转速为常数时,低压涡轮效率的下降,低压涡轮功小于风扇增压级功,导致低压转速下降,转差增加,风扇稳定性裕度增大。

低压涡轮或风扇和增压级效率偏离设计值也不改变高压涡轮和高压压气机的功平衡,因此,当高压转速不变时,高压压气机工作点共同线上的位置不变,燃油流量不变,涡轮前温度也保持不变。

由于燃油流量不变,低压效率下降,因此推力略有降低。

(2)控制规律保证 $n1r = \text{const}$

当低压转速为常数时,由于低压涡轮效率的下降,低压涡轮功小于风扇增压级功,导致低压转速有下降的趋势,在调节器保证 $n1r = \text{const}$ 的条件下,为了增大低压涡轮功,功平衡恢复,燃油流量增大,涡轮前温度升高,高压转速升高。从前面分析可知,高压压气机特性图上的共同工作线位置不改

变,但高压转速升高,工作点沿共同工作线向上移动。同时转差增加,风扇稳定性裕度增大。由于燃油流量增大,推力增大。

风扇增压级效率降低导致压缩空气所需的功多于低压涡轮可用功,风扇增压级效率对部件的共同工作和发动机主要参数的影响与低压涡轮效率的影响相似。

表 2 为低压涡轮或风扇增压级效率降低对发动机主要性能参数的影响趋势。

采用 Gasturb 软件大涵道比涡扇发动机算例和通用特性,计算了不同控制规律下低压涡轮和风扇增压级效率分别降低 2% 时对部件共同工作的影响。计算结果见图 3 和图 4,图中点 1(图标为□)控制规律为 $n_{1r} = \text{const}$,点 2(图标为▽)控制规律为 $n_{2r} = \text{const}$ 。

表 2 低压涡轮或风扇增压级效率降低对发动机主要性能参数的影响趋势

控制规律	N_{1r}	N_{2r}	T_4	W_f	ΔSML	ΔSMH	F	Sfc
$N_{1r} = c$	→	↑	↑	↑	↑	→	↑	↑
$N_{2r} = c$	↓	→	→	→	↑	→	↓	↑

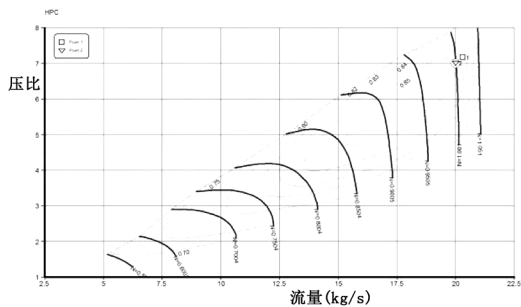


图 3 低压涡轮或风扇增压级效率降低对高压共同工作的影响

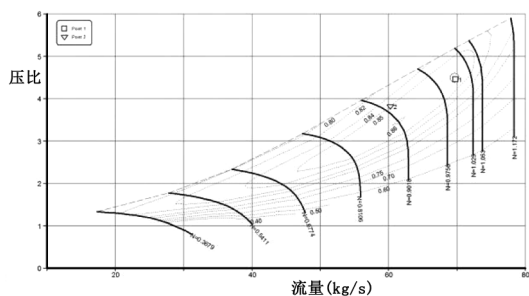


图 4 低压涡轮或风扇增压级效率降低对低压共同工作的影响

3 燃烧室效率的影响

燃烧效率包括燃烧室总压恢复系数和完全燃

烧系数。

3.1 燃烧室总压恢复系数

燃烧室总压恢复系数首先影响核心机部件共同工作,根据高压部件共同工作方程,燃烧室总压恢复系数减小,相当于高压涡轮导向器面积减小,导致高压压气机特性图上的共同工作线向喘振边界移动,使喘振裕度减小。

(1) 控制规律保证 $n_{2r} = \text{const}$

当高压转速为常数时,由于高压压气机压比增高,功增大,高压转速有下降的趋势,为了功平衡,燃油流量增加,涡轮前温度增加,涡轮功增大,喘振裕度降低。低压涡轮功增大,低压转速增大,导致转差减小,低压共同工作线向喘振边界移动。

(2) 控制规律保证 $n_{1r} = \text{const}$

当低压转速为常数时,由于高压压气机压比增高,功增大,高压转速下降,高压涡轮功减小,低压涡轮进口温度升高,低压涡轮功增大,低压转速有上升的趋势,为了功平衡,燃油流量减小,高压涡轮前温度降低,喘振裕度降低。但由于燃烧室总压恢复系数的降低占主导作用,高压涡轮前温度升高,喘振裕度增大。由于转差减小,低压共同工作线向喘振边界移动。

表 3 为燃烧室总压恢复系数降低对发动机主要性能参数的影响趋势。

燃烧室总压恢复系数范围变化很小,因此对发动机主要性能参数的影响也很小,对部件共同工作点的移动也很小。

表 3 燃烧室总压恢复系数降低对发动机主要性能参数的影响趋势

控制规律	N_{1r}	N_{2r}	T_4	W_f	ΔSML	ΔSMH	F	Sfc
$N_{1r} = c$	→	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↑
$N_{2r} = c$	↑	→	↑	↑	↓	↓	↑	↑

3.2 完全燃烧系数

完全燃烧系数的变化,按涡轮前温度不变时用燃油流量的反比例变化来补偿,也就是用耗油率的变化补偿。此时,发动机其他参数保持不变(发动机流路中工作介质质量流量的变化可以忽略不计)。可见,完全燃烧系数对部件共同工作没有影响。

4 结论

(1) 对已有的发动机,部件性能的变化会影响

发动机几乎所有部件的共同工作,这些部件共同工作线位置或特性线上工作点位置有相应的改变,因此,发动机工作过程参数、截面温度和压力、发动机空气流量、单位参数和主要数据都有改变。变化的幅度还与具体发动机有关,也就是新工作点位置的效率有关。

(2)不同部件性能变化,不同的控制规律对部件的共同工作影响不同,有些参数变化方向可能相反,应具体分析。

(3)无论哪一种控制规律,高压部件效率的降

(上接第3页)

利用 Gasturb 软件对某涵道比为 9 的混排涡扇发动机进行了计算,其中高温起飞和最大连续工况的控制策略为低压换算转速不变,而进场慢车工况则控制高压换算转速不变。计算结果如图 4 和图 5 所示,由于共同工作线的提高,各工况高压压气机的喘振裕度均下降 8%~10%,推力下降 5%~8%,由于燃烧室的效率急剧下降等因素的影响,耗油率升高约 20%。另外,从结果可以发现吸雨对发动机低状态时的影响更大。

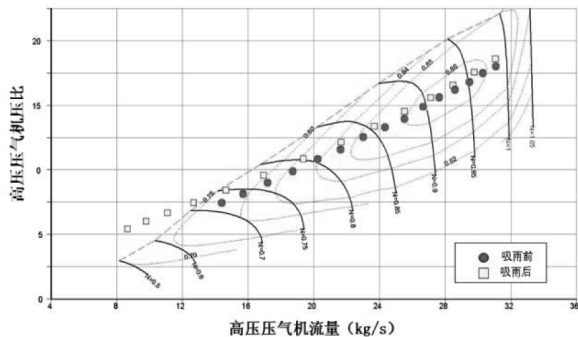


图 4 高压压气机喘振裕度的影响(高温起飞)

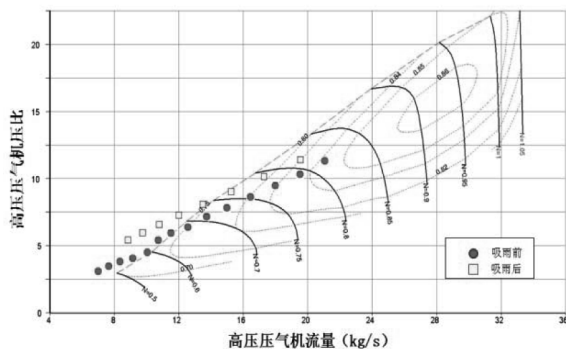


图 5 高压压气机喘振裕度的影响(进场)

根据以上计算,可初步得到吸雨对性能及气动

低会导致低压喘振裕度降低,低压部件效率的降低不会改变高压部件共同工作线的位置。

(4)无论部件性能变化对共同工作的影响如何,部件效率降低,耗油率升高,推力与燃油流量有关,燃油流量增大,推力增大。

参考文献:

[1] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2005.

稳定性的影响。发动机吸雨后,喘振裕度下降较快,对加速性能造成较大影响。为了提高发动机吸雨状态下的安全性,可以考虑改进常用的控制规律,包括对换算转速与推力关系进行修正并配合其它变几何控制,如 VSV 角度控制,以保持吸雨工况时推力的稳定。

3 结论

针对发动机吸雨情况下的雨水对发动机的影响,建立了部件气动热力损失、机械损失和工质热力学通用模型,并借鉴适航咨询通告初步定义了关键吸雨工况及水含量。基于商用性能分析软件,在加入了雨水工况各种模型及修正下,初步分析了一个大涵道比 9 的涡扇发动机在吸雨工况下性能的变化。结果表明,吸雨工况下,压缩部件的喘振裕度下降 8%~10%,推力下降 5%~8%,耗油率升高约 20%,对发动机的性能带来较大影响,吸雨对发动机低状态时的影响更大。

参考文献:

[1] AC33.78-1. Turbine engine power-loss and instability in extreme conditions of rain and hail.

[2] Day, I. . Rain Ingestion in Axial Flow Compressors at Part Speed[J]. Journal of Turbomachinery, 2008. 130: p. 011024-9.

[3] Theoklis Nikolaidis. Water Ingestion Effects on Gas Turbine Engine Performance[D]. PhD Thesis, Cranfield University, 2008.

[4] P. P. Walsh & P. Plethcer. Gas Turbine Performance[M]. Blackwell Science Ltd, 1998.