

# 涡轴发动机起动控制规律研究及故障分析

汪涛\*, 赵海刚, 姜健

中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089

**摘要:** 针对某型涡轴发动机热起动过程中频发的喘振故障, 通过涡轴发动机起动控制过程分析和起动供油规律研究, 分析影响发动机起动性能的各种因素, 特别是喘振形成机理, 得出故障原因, 并提出了改进建议。其经验对其他类型的发动机亦具有参考价值。

**关键词:** 热起动; 起动故障分析; 供油规律; 喘振

中图分类号: V235.12 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 02-0020-05

起动是航空燃气涡轮发动机的一个重要过渡过程。对发动机起动系统基本要求是:在不喘振不超温的情况下,在给定的时间内按照给定的起动和燃油控制程序点燃主燃烧室,并将发动机平稳加速到慢车<sup>[1-2]</sup>。涡轴发动机的起动过程是非常复杂的气动热力学过程,涉及到起动机、供油系统和发动机各个部件之间的协同工作,安全可靠、快速的起动是保证其顺利进入正常工作的前提。供油量是否准确直接关系到起动的成功率,供油量若比要求供油量大,会导致燃烧室内气体在短时间内上升到很高的温度,经过燃气涡轮做功后仍然具有很高的焓值,使得燃气涡轮后排气温度 $T_{45}$ 超限,因此可能造成起动失败或热端部件损坏。对于国外成熟的发动机控制系统来说,通常采用油气比的方式来对燃油流量进行控制,保证发动机不会出现超温、悬挂、压气机喘振等现象<sup>[3]</sup>。

## 1 起动供油控制规律研究

某型发动机是数字电子控制器+液压机械控制装置系统。系统根据燃气涡轮转速 $N_g$ 、离心压气机出口压力 $P_3$ 、压气机进口温度 $T_2$ 的变化、电子控制器的配平信号、可用功率轴和负载要求轴的信号,来计量供给发动机所需燃油和作动筒输出位移量,从而控制可调导叶角度和压气机放气量;具有燃油的计算、计量、压气机放气、防冰控制和可调叶片控制等

功能。

某型发动机起动慢车过程中电调不参与工作,液压机械控制装置系统起一个普通的燃气发生器转速控制器的作用。发动机的调节程序(如加速燃油流量和压气机可转叶片位置等)由液压机械控制装置系统中的一个三维凸轮控制。三维凸轮的位置取决于 $N_g$ 和 $T_2$ 。加速极限是由 $N_g$ 和 $T_2$ 对应的可变几何/加速控制三维凸轮的最大调定位置确定的。最小流量调定位置用于控制发动机减速。计量活门最大止动钉确定了燃油流量的最大绝对极限,最小流量活门位置确定了燃油流量的最小绝对极限。

发动机起动燃油流量是自动调节的,点火时流量固定不变。在液压机械控制装置系统调节下,按照 $N_g$ 、 $P_3$ 和 $T_2$ 的预定程序提供加速燃油流量,直到达到慢车转速。当发动机达到慢车后,燃油流量按地面慢车下降曲线提藕节。在地面慢车时,动力涡轮转速不受控制。

根据以上起动供油规律的分析,可知某型发动机起动过程中燃油流量可用函数关系:

$$W_f = f(N_{g_{co}}, T_2, P_3) \quad (1)$$

式中: $N_{g_{co}}$ 表示燃气涡轮换算转速, $T_2$ 表示压气机进口温度, $P_3$ 表示离心压气机出口压力。

为了研究某型发动机起动供油规律,本文将地面起动试

收稿日期: 2015-08-31; 退修日期: 2015-10-09; 录用日期: 2015-10-16

\*通讯作者. Tel.: 029-86839374 E-mail: hatal@sina.com

引用格式: WANG Tao, ZHAO Haigang, JIANG Jian. Study on starting control law and trouble shooting of turboshaft engine [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(02): 20-24. 汪涛, 赵海刚, 姜健. 涡轴发动机起动控制规律研究及故障分析 [J]. 航空科学技术, 2016, 27(02): 20-24.

验得到的 $W_f/P_3$ 与 $Ng_{co}$ 转速进行对比分析。对5种不同的环境温度下,地面起动时的数据进行分析。图1为5次试验中不同环境温度条件下起动到慢车过程中,发动机油气比随着换算转速变化图,图2是5次试验点进行二项式拟合曲线。

本文基于以下原因以 $W_f/P_3$ 作为加速过程的控制参数:

(1)  $W_f/P_3$ 是表示油气比的参数,因此它能反应涡轮进口温度 $T_3$ ;

(2) 用 $W_f/P_3$ 与 $Ng_{co}$ 的函数关系能够比较精确地表示压气机的喘振特性。

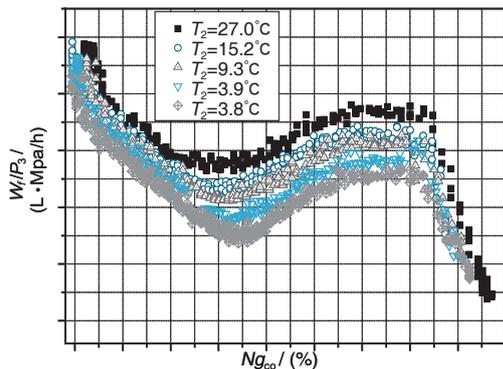


图1 不同 $T_2$ 条件下 $W_f/P_3$ VS  $Ng_{cr}$ 变化  
Fig.1  $W_f/P_3$ VS  $Ng_{cr}$  in different  $T_2$

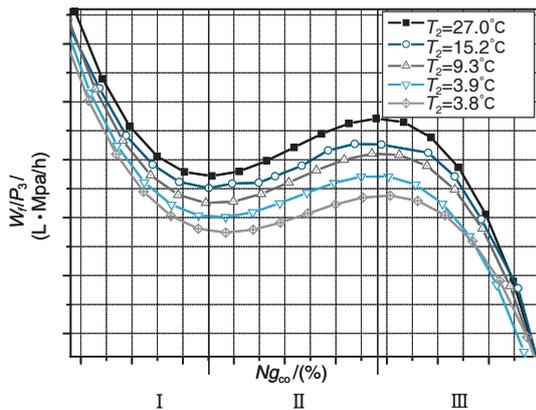


图2 拟合曲线  
Fig.2 Fitting curve

随着外界环境温度的升高,压气机进口温度 $T_2$ 随之升高,由多项式拟合曲线可以看出:

发动机本体用来测量 $T_2$ 的温包,随着外界温度升高,发动机油气比 $W_f/P_3$ 在I阶段始端也略有增加。起动燃油流量是自动调节的,点火时流量固定不变。

随着发动机转速的不断增加,在不同 $T_2$ 情况下,发动机 $Ng$ 在II区间内,油气比( $W_f/P_3$ )变化尤为明显。

发动机起动过程从图中看出可分为三个阶段:

(1) I阶段时,为了保证燃烧室不出现富油情况, $W_f/P_3$ 随发动机换算转速的增加而减小;

(2) II阶段时, $W_f/P_3$ 随发动机换算转速的增加而增加,该阶段就是起动过程中的供油加速阶段;

(3) III阶段时,为了防止发动机超温, $W_f/P_3$ 随发动机换算转速的增加而减小来降低燃烧室内油气比。

发动机起动时,起动供油规律由液压机械装置自动给出, $W_f/P_3$ 比值作为燃气发生器转速 $Ng$ 和压气机进口温度 $T_2$ 的函数控制计量活门周向开度,发动机压气机出口静压 $P_3$ 通过膜盒控制计量活门轴向开度,使发动机按照预定供油计划加速至地面慢车状态。实际的油气比规律由加速的三维凸轮给出,该三维凸轮的 $W_f/P_3$ 比值也是燃气发生器转速 $Ng$ 和压气机进口温度 $T_2$ 的函数。由式(1)转换得:

$$W_f/P_3 = f(T_2, Ng) \quad (2)$$

## 2 热起动喘振故障分析

### 2.1 地面起动喘振故障

起动时,发动机出现异常响动,经查看数据发现,发动机起动过程中 $T_{45}$ 达到最大值 $T_{45max}$ (接近限制值),图3、图4为当日两次起动过程图。从图4中可以看出,在起动的初始阶段,冷起动的燃油流量值低于热起动的燃油流量值。而此时热起动时的 $P_3$ 压力低于冷起动时的 $P_3$ 压力值,发动机在C点前出现了明显波动,且在C点出现了 $P_3$ 陡然上升,对应的 $W_f$ 值在B点也随之迅速上升。

从图5、图6中可以看出,发动机在热起动过程中燃油流量出现突增。如图6所示,转速是平稳增加的,意味着进气量是平稳增加的,所以油气比突然增大, $T_{45}$ 增大表明燃烧室是富油燃烧。温度突升会导致相应截面气流流通能力下降,从而对上游气流形成节流,容易造成流动堵塞,发生喘振。

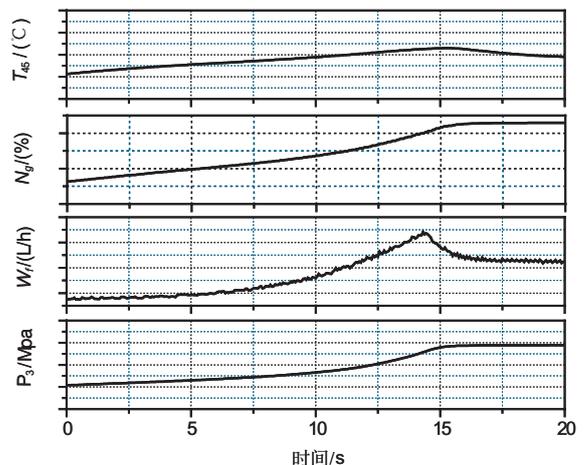


图3 发动机冷起动试验曲线  
Fig.3 Cold start process

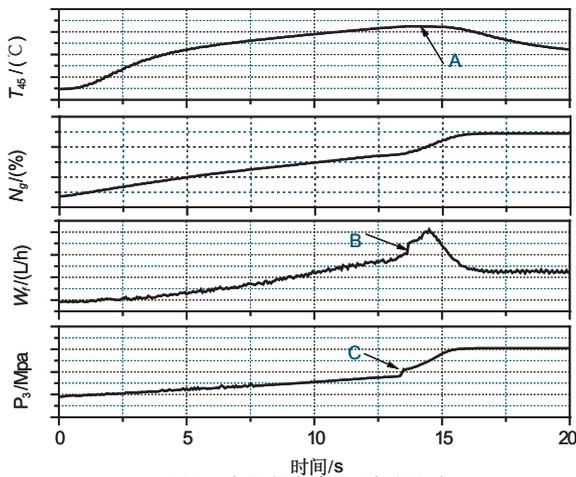


图4 发动机热起动试验曲线  
Fig.4 Hot start process

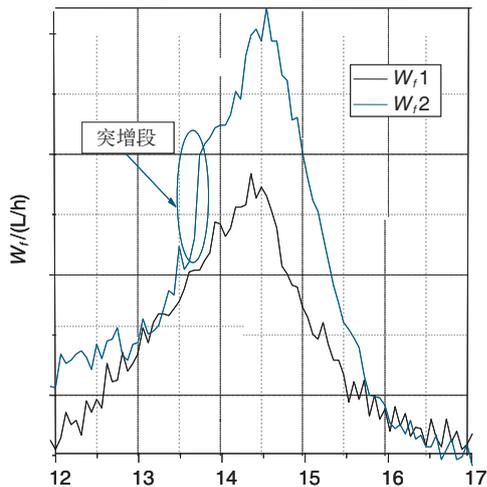


图5 热起动时燃油流量变化曲线  
Fig.5 Fuel flow curve in hot start

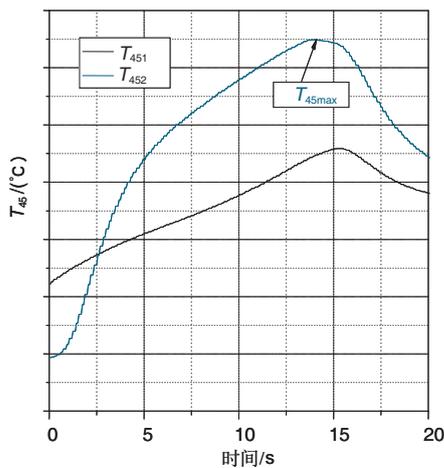


图6 热起动时 $T_{45}$ 变化曲线  
Fig.6  $T_{45}$  curve in hot start

## 2.2 空中起动过程中瞬时 $T_{45}$ 偏高, $P_3$ 压力波动

起动过程中,最高的 $T_{45}$ 温度值较大,同时伴有较大幅值

的 $P_3$ 压力波动,说明压气机短时有不稳定工作的迹象, $Hp_3$  ( $Hp_1 < Hp_2 < Hp_3$ ) 起动过程中,会接近 $T_{45}$ 温度限制值,随着高度的升高,起动会比较困难。两次参数变化如图7、图8所示。

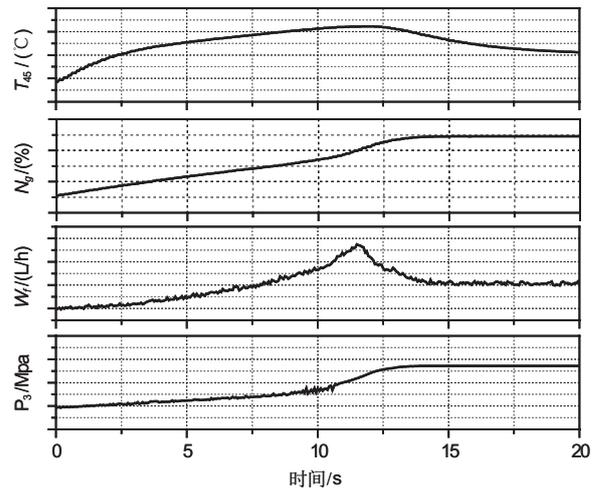


图7  $Hp_1$ 空中起动参数变化曲线  
Fig.7  $Hp_1$  Airstart process

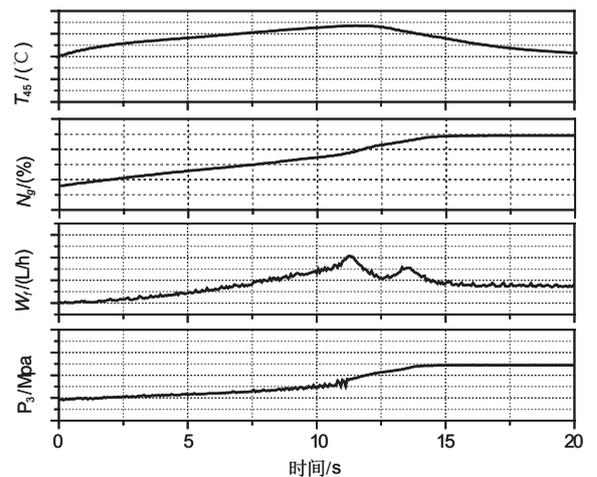


图8  $Hp_2$ 空中起动参数变化曲线  
Fig.8  $Hp_2$  Airstart process

## 3 故障原因分析

### 3.1 $T_2$ 传感器测量误差,导致供油过快

压气机入口温度( $T_2$ )传感器的测量值大于实际值而导致进入液压机械控制装置系统参与控制的 $T_2$ 温度过高,由上述对发动机起动供油规律分析可知(图2),过高的 $T_2$ 在 $Ng$ 相同的情况下,必然会导致发动机燃油供油量大于需要燃油供应量,起动加速供油量过大,加之燃烧室余温影响,燃烧室的起动温度升高过快,引起发动机的进气流量系数减小,发动机燃烧室富油燃烧,最终产生喘振。

### 3.2 $P_3$ 压力膜盒产生热变形

液压机械控制装置系统除了燃油计量功能之外,液压机

械控制装置系统还通过其左侧伸出的液压活塞,控制着可变几何联接的位置。压气机的作用得到 $P_3$ 压力也就是压气机增压压力,其作用在一个膜盒上,该膜盒用于平衡顶杆的输入,以保持最佳的油气比。由于本体传热和发动机余温的影响,感受 $P_3$ 压力的膜盒可能会产生热变形,控制计量活门轴向开度的不精确,这就造成对燃油计量阀进行液压定位的不准确。

### 3.3 防喘系统放气量偏少

当压气机从低转速加速时,存在物理规律所允许的最大加速速率。如果加速速率过大,压气机后部的气流将会停止流动(压气机叶片失速)同时进入发动机的 $P_3$ 空气供应将会波动,这就产生了压气机失速或喘振。其副作用有三个方面:轴流压气机中的旋转失速将随着气流反流和喘振造成过大的应力;热端部件的增压空气中段将会导致直接的功率损失;热端部件将承受过大的温度。

## 4 喘振的形成过程

旋转失速首先发生在某一个或几个较为薄弱的叶片通道内,随机迅速向周向和径向发展。当旋转失速的叶片发展到一定数目时,整套压气机通道就会出现被涡流阻塞的现象,流动瞬时中断,同时后面的高压气流始终有一种回冲的趋势。在阻塞的瞬间,当气流向后流动的动能不足以克服回冲能量时,气流就会倒流,从而减小了压气机的前后压差。分离后的涡流在液流的推动下,又向后流动直至被吹出压气机,压气机进口又重新进气。但是过小的空气流量的环境未改变时,就会出现再失速、再阻塞、再中断、再吹出,再流动的周期性的轴向振荡现象,导致空气流量时大时小,压力忽高忽低,发动机工作极不稳定,严重时,甚至会出现“回火”,加之发动机防喘装置的放气量不足,这便更加速压气机的喘振。现在将喘振的形成过程归纳如图9所示<sup>[4-5]</sup>。

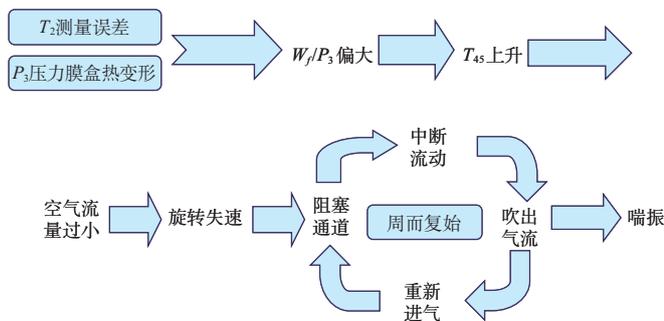


图9 喘振形成过程流程图

Fig.9 Surge process schematic

## 5 结论

通过对某型发动机喘振故障分析,得到以下结论及建议:

(1) 在进行起动过程中液压机械控制装置根据压气机进口温度 $T_2$ 和燃气涡轮转速来确定 $W_f/P_3$ 工作线;根据压气排气压力 $P_3$ 结合 $W_f/P_3$ 工作线来对供油油量进行控制,保证燃烧室不会有富油情况发生使发动机能够平稳的加速到慢车状态。

(2) 压气机入口温度( $T_2$ )传感器的测量值大于实际值而导致进入液压机械控制装置系统参与控制的 $T_2$ 温度过高,导致发动机燃油供油量大于需要燃油供应量,起动加速供油量过大和燃烧室余温影响,燃烧室的起动温度升高过快,引起发动机的进气流量系数减小,发动机燃烧室富油燃烧,产生喘振;试验中可去改善 $T_2$ 传感器通风环境或在起动前对发动机进行冷吹来降低涡轮间隙温度,使发动机入口空气能够更快地流到 $T_2$ 传感器感受区及减低本体传热对 $T_2$ 的影响。

(3) 作用在平衡顶杆的 $P_3$ 压力膜盒,由于本体传热和发动机余温的影响,产生热变形,造成对燃油计量阀进行液压定位的不准确,难以保持最佳的油气比,最终造成燃烧室富油。可在起动过程中增加压气机放气量,并对 $P_3$ 压力传感器材料进行优化,使其热变形性能提高。 AST

## 参考文献

- [1] 朴英.航空燃气涡轮发动机起动性能分析[J].航空动力学报,2003,18(6):777-782.  
PIAO Ying. An analysis of the starting characteristics of aeroengine[J].Journal of Aerospace Power, 2003, 18(6): 777-782.(in Chinese)
- [2] 周文祥,黄金泉.涡扇发动机高空起动模型研究[J].航空动力学报,2007,22(8):1384-1390.  
ZHOU Wenxiang, HUANG Jinquan. Research on the startup model of turbofan engine at high altitude[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8): 1384-1390.(in Chinese)
- [3] 王强,傅强.航空发动机主燃油控制系统稳态过程分析[J].科学技术与工程,2007,7(12):3028-3030.(in Chinese)  
WANG Qiang, FU Qiang. Steady state processes analysis of aero-engine main fuel control system[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(12): 3028-3030.(in Chinese)
- [4] 韩殿武.涡轴8型发动机起动过程中排气温度的控制[C]//2006年中国航空学会动力年会:764-768.

HAN Dianwu. Exhaust gas temperature control in turboshaft-8 engine starting process[C]//CSAA 06-P-130, 2006: 764-768. (in Chinese)

[5] 郭海松,韩生寅.涡轴发动机的喘振及防喘[C]//第十四届全国直升机会,1998.

GUO Haisong, HAN Shengyin. Surge and anti-surge on turboshaft

engine[C]// The 14th National Helicopter Annual Meeting, 1998.(in Chinese)

#### 作者简介

汪涛(1982—)男,硕士,工程师。主要研究方向:航空发动机。

Tel: 13571493582/029-86839374

E-mail: hatal@sina.com

## Study on Starting Control Law and Trouble Shooting of Turboshaft Engine

WANG Tao\*, ZHAO Hai-gang, JIANG Jian

*Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China*

**Abstract:** Aiming at starting control law and high frequency hot start surging failure of a turbo shaft engine, analysis of start control program and various factors that affecting starting performance was conducted, especially basic formatting rules of the surging, locating failure reason and suggestions for improvement. The experiences have reference values for other engines.

**Key Words:** hot start; trouble shooting on start process; fuel supply law; surge