航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Sep. 15 2018 Vol. 29 No.09 43-47

涡扇发动机战斗／训练状态转换潜力挖掘试验与评估技术

高莎莎*，周超

中国飞行试验研究院，陕西 西安 710089

摘　要：基于战机综合作战能力提升和无约束操作使用等方面的需求，本文对某涡扇发动机战斗／训练状态转换高压转速限制问题进行了分析。对转换限制转速以上战斗／训练转换过程及过程中可能出现的风险进行了研究。通过改进中间状态战斗／训练转换控制逻辑及在某涡扇发动机上进行验证，证实该措施可靠有效。为某涡扇发动机战斗／训练状态转换潜力挖掘试验奠定了基础，后续还可将该措施应用于加力状态的转换，对其他类型发动机潜力挖掘试验与评估的开展具有一定的参考价值。

关键词：涡扇发动机；状态转换；潜力挖掘；控制逻辑；飞行试验

中图分类号：V231.3　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.09.043

军用飞机在现代空战和未来战争中都发挥着不可替代的作用，目前飞机集进攻、防御、武器于一身，而作为飞机心脏的航空发动机更是重中之重。研制出高可靠性、高耐久性、高性能的发动机是基本要求，而其作战使用能力同等重要。因此，现代发动机试飞不仅应验证其设计指标的符合性，更重要的是其在作战使用环境下评估其作战效能和适用性。

目前，航空发动机普遍存在着性能、寿命以及安全之间的矛盾，各国也一直在致力于解决该问题[1~3]。其中多种型号的发动机为了解决这一矛盾，采用了战斗／训练状态控制。如俄罗斯 АЛ-31Ф 系列加力式涡扇发动机及国内某系列涡扇发动机均采用该方法控制，但目前战斗／训练状态转换均存在高压转速限制，即在高压转速在给定值以上不允许进行战斗／训练状态转换。这在飞行中限制了飞行员的操纵，给飞行员带来额外的负担，尤其是在作战环境中，极大地影响了飞行员的作战能力。因此，一方面为了尽可能少地限制飞行员的操纵，提升其作战能力，另一方面为了挖掘发动机的潜能，发展新技术，本文对某涡扇发动机战斗／训练状态转换高压转速限制问题进行了分析，旨在将试飞理念从设计符合性验证转向注重作战使用能力的考核。

本文主要从某涡扇发动机战斗／训练状态转换的限制条件入手，分析该限制存在的意义及其合理性，并对其潜能进行挖掘，旨在实现飞行包线范围内的无约束操作使用。

1 战斗／训练转换原理

由于发动机在中间及加力状态工作负荷大，是损伤发动机的主要因素，因此，某型涡扇发动机为了解决性能与寿命这一矛盾，在中间及以上状态设立了战斗／训练两种控制方法。其主要原理是将发动机工作分为战斗、训练两种状态：在战斗状态下，为充分发挥发动机工作潜能，将其使用状态控制在安全极限范围内，以便保证在安全的前提下获得最大推力，提高飞机作战使用性能；在训练状态下，将其转速、燃气温度等限制值相应地降低，减少发动机的负荷，延长发动机使用寿命并提高其工作可靠性。这两种状态的切换是靠飞机驾驶舱内的战斗／训练转换开关。而发动机手册上明确规定：发动机战斗状态和训练状态的状态转换开关应在压气机转速小于某一给定值时接通或断开。因此，在需要状态转换时，飞行员首先要关注转速是否在限制范围内，调整发动机转速到指定范围内才能进行切换，这就给飞行员增加了额外的操作负担，尤其是在作战等紧急状态下可能会产生比较大的影响[4~6]。

收稿日期：2018-06-08；　退修日期：2018-07-10；　录用日期：2018-08-12

* 通信作者 . Tel.：17792633208　E-mail：574640684@qq.com

引用格式：Gao Shasha, Zhou Chao. Combat/Training state transition potential mining test and evaluation technique of turbofan engine[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (09): 43-47. 高莎莎，周超 . 涡扇发动机战斗／训练状态转换潜力挖掘试验与评估技术 [J]. 航空科学技术，2018, 29 (09): 43-47.

某型发动机战斗 / 训练状态转换控制原理如图 1 所示，先由飞行员在驾驶舱打开训练或战斗状态开关，发送指令到发动机控制系统，然后控制系统通过不同的控制规律调整供油量，改变发动机转速、涡轮后温度、压气机出口压力等状态参数。在发动机处于中间状态以下，战斗状态与训练状态控制规律相同，当发动机状态到达中间状态及以上，训练状态与战斗状态控制规律不同，区别在于风扇转速 n_1、压气机转速 n_2、低压涡轮后温度 T_6 均较战斗状态有一定量的减小。

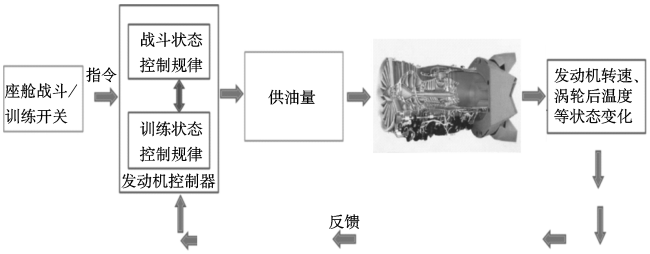

图 1 某发动机战斗 / 训练状态转换控制原理图

Fig.1 An engine combat/training state transition control schematic

2 限制转速以上状态转换可行性分析

从发动机状态转换控制结果来看，该状态转换是限制值的改变，而从根本上讲是发动机供油量的改变，从战斗状态转换为训练状态相当于减少发动机供油量，由训练转换为战斗则相当于增加发动机供油量，也就是相当于发动机加减速过程。在压气机转速给定值以下切换时，切换时刻战斗、训练状态控制规律相同，即在状态转换过程中没有大的供油量的调整，也就不会出现参数的波动；该压气机转速给定值是处于发动机的节流状态，在转速给定值到中间状态范围内切换发动机状态，由于控制规律相同，发动机状态参数也不会有大的波动；而在发动机中间或加力状态切换时，由于控制规律不同，发动机会有较大的供油量的调整，相当于一个急加速或急减速过程，该过程可能会引起发动机参数较大的波动，也就是该限制存在的原因。因此，分析限制转速以上状态转换的可行性主要是分析中间及加力状态切换的可行性，可以从发动机供油规律入手。

2.1 状态转换工作过程

2.1.1 战斗状态转训练状态

该过程是一个供油量减少的过程，相当于一个减速过程。当发动机状态在压气机转速给定值以下切换时，发动机参数无波动，等到发动机状态增加到中间状态时，由于控制规律的不同，该状态下发动机各参数较战斗状态则有一定的减小。但当发动机状态在中间或加力状态转换时：若转换前后发动机工作点相差较大，满足进入减速过程控制条件，则发动机会按照减速供油规律进行控制，减速至训练状态对应的计划点；若转换前后发动机工作点相差不大，不满足进入减速过程控制条件，则相当于进入超调控制，减少供油量使发动机状态下降至训练状态对应的计划点。

结合之前试飞数据，分析了该发动机某次飞行中战斗状态转训练状态后的各参数变化，状态转换时发动机具体参数（文中所有参数已进行无量纲处理）如图 2 所示，图中 W_f 为发动机供油量、GSTR 为战斗训练转换信号、T_6 为涡轮后温度、n_2 为压气机转速、n_1 为风扇转速、PHI 为发动机油门杆角度。战斗 / 训练状态转换时发动机处于节流状态，切换时刻压气机转速为 0.86。从图中可以看出切换瞬间 T_6 限制值从 1 降至 0.95，风扇转速限制值从 1.11 降至 1.07，但由于控制规律不变，供油量没有调整，则各参数没有变化。而在后续发动机油门推至中间状态，n_1 为 1.05，n_2 为 0.99，T_6 稳定时为 0.95，供油量为 0.94。

2.1.2 训练状态转战斗状态

该过程是一个供油量增加的过程，相当于一个加速过程。当发动机状态在压气机转速给定值以下切换时，发动机参数无波动，等到发动机状态增加到中间状态时，由于控制规律的不同，该状态下发动机各参数较训练状态则有一定的增加。但当发动机状态在中间或加力状态转换时，若转换前后发动机工作点相差较大，满足进入加速过程控制条件，则发动机会按照加速供油规律进行控制，加速至战斗状态对应的计划点；若转换前后发动机工作点相差不大，不满足进入加速过程控制条件，则相当于进入超调控制，增加供油量使发动机状态上升至战斗状态对应的计划点。

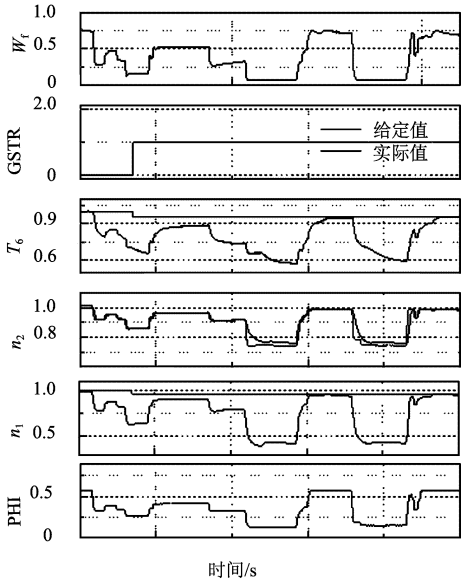

图 2 某次飞行中战斗状态转训练状态后的各参数变化

Fig.2 Changes of parameters after combat transition to training state in a flight

结合之前试飞数据，分析了该发动机某次飞行中训练状态转战斗状态后的各参数变化，状态转换时发动机具体参数如图 3 所示。该次战斗 / 训练状态转换时发动机处于节流状态，切换时刻压气机转速为 0.86。从图中可以看出切换瞬间 T_6 限制值从 0.96 增加到 1，风扇转速限制值从 0.96 增加到 1，但由于控制规律不变，供油量没有调整，则各参数没有变化。而在后续发动机油门推至中间状态时，其 n_1 值为 0.99，n_2 为 0.98，T_6 稳定时为 0.99，供油量为 0.93。

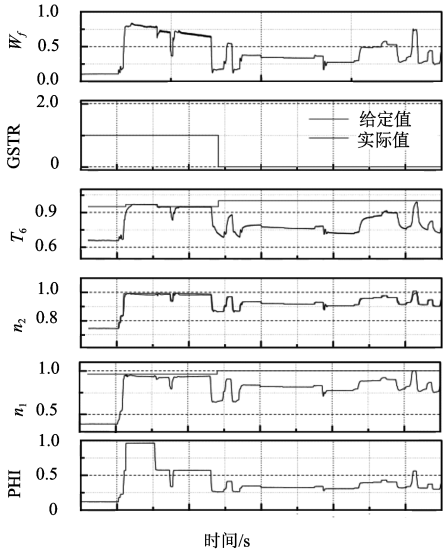

图 3 某次飞行中训练状态转战斗状态后的各参数变化

Fig.3 Changes of parameters after training transition to combat state in a flight

2.2 中间及以上状态转换风险分析

2.2.1 战斗状态转训练状态

战斗状态转训练状态是一个工作状态降低的过程，从理论角度分析在中间及以上状态转换是可行的，不会对发动机使用及安全造成大的影响。主要有以下几方面影响。

(1) 可能出现发动机超温报故

由于发动机战斗和训练状态的涡轮后温度限制值不同（中间状态战斗限制值为 1，训练状态为 0.96；加力状态战斗限制值为 1.08，训练状态为 1.02），当发动机在中间或加力状态从战斗转为训练状态时，控制系统会立即切换涡轮后温度限制值，若 T_6 不能及时降低至训练状态限制值之下，则很有可能出现发动机超温报故。该报故不属于真正的故障，几秒之后或稍微收一下油门杆便可恢复正常，不影响飞行安全；若几秒之后故障仍然存在，则应该收油门杆至慢车状态，返航。该影响对飞行安全和发动机使用不会产生危害，在可接受范围内。

(2) 可能出现发动机喘振报故

由于发动机几何面积可调机构均与发动机状态有关，如风扇进口可调叶片角度 α_1 按低压换算转速控制、压气机进口可调叶片角度 α_2 按高压换算转速或 25 截面换算转速控制，当发动机在中间及以上状态由战斗转换成训练状态，也就是由较高的高低压转速瞬时转为较低的高低压转速后，则 α_1、α_2 会调整至相应大小，此时有可能造成流道面积与其内气流不匹配，产生流道堵塞，进而发生喘振现象。若出现喘振情况，则立即收油门杆至慢车状态，若喘振自动消除，则返航；若喘振未能消除，则拉停发动机，下滑增速进入起动包线，执行空起程序。该影响对飞行安全和发动机使用会产生一定的危害，在飞行过程中不能接受。

(3) 可能存在推力脉动的情况

由于在中间及以上状态从战斗切换到训练状态时，发动机处于一个急减速过程，供油量可能会出现突然减少的现象，造成发动机主燃烧室内油量突然减少，产生推力脉动。该情况出现对飞行安全影响不大，但是对飞行员的操纵体验有一定的影响，应尽可能避免。

2.2.2 训练状态转战斗状态

训练状态转战斗状态是一个工作状态增大的过程，从理论角度分析在中间及以上状态转换主要有以下几方面影响。

(1) 可能会产生失速

由于发动机状态的变化会使得发动机几何面积可调机构随之变化，如风扇进口可调叶片角度 α_1 按低压换算转速控制、压气机进口可调叶片角度 α_2 按高压换算转速或 25 截面换算转速控制，当发动机在中间及以上状态由训练转换成战斗状态，也就是由较低的高低压转速瞬时转为较高的高低压转速后，则 α_1、α_2 会调整至相应大小，会使得发动机流道迅速放大，可能会在部分流场产生失速，但随着发动机状态增大，流场会恢复正常，对发动机及飞行安全影响较小。

(2) 可能存在推力脉动的情况

与训练切换到战斗状态类似，在中间及以上状态从战斗切换到训练状态时，发动机处于一个急加速过程，供油量可能会出现突然增多的现象，造成发动机主燃烧室内油量突然增加，产生推力脉动。该情况出现对飞行安全影响不大，但是发动机推力突增对飞行员的操纵体验影响较大，应尽可能避免。

综上所述，在中间及以上状态进行战斗 / 训练转换没有技术上的难度，不会对发动机造成损害，也不会对飞行安全造成大的影响，可能出现的问题均是由于状态转换时加减速过程太快造成，因此，考虑到对其转换逻辑进行改进，对中间

及以上状态的战斗 / 训练转换进行过渡处理，将其转换过程增加到 3s，按线性过渡处理，这样就可以避免上述分析到的各种影响，既可以保证发动机工作安全稳定，又可以使飞行员有良好的体验。

3 控制逻辑改进后飞行试验验证情况

为了放开战斗 / 训练转换必须在转速达到给定值以上进行的限制，减少操纵过程中对飞行员的限制，避免中间状态转换时可能出现的各种不稳定因素，以中间状态的战斗 / 训练转换为例，对其进行了 3s 的线性过渡处理，控制逻辑改进后的发动机已进行相关地面试验，并搭载某飞机平台进行试飞验证。

（1）战斗状态转训练状态

以试飞验证过程中某次转换为例，在中间状态进行战斗转训练状态，此时发动机具体参数如图 4 所示。

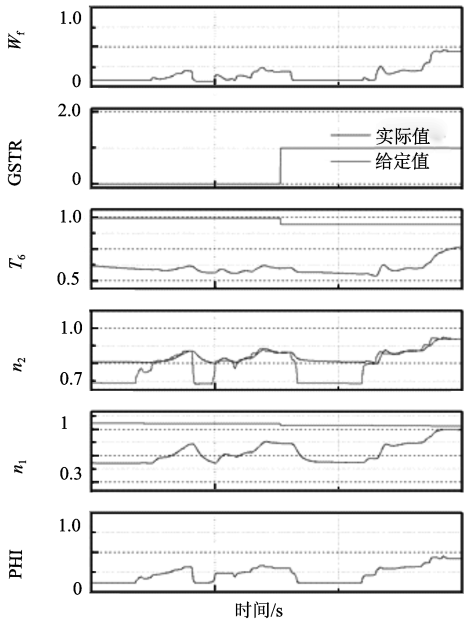

图 4 中间状态时战斗转训练状态后的各参数变化

Fig.4 Changes of parameters after combat transition to training state in intermediate state

从图中可以看出，与之前战斗转训练状态过程相比，n_1、n_2、T_6 给定均是以一个 3s 的线性过渡实现的，与控制逻辑更改相符合。转换时刻发动机处于中间状态，n_2 转速为 0.96，整个转换过程中参数过渡平稳，未出现超温、喘振、推力脉冲等异常现象，说明该方法切实可行，在中间状态取消战斗转训练状态的限制是可以成立的。

（2）训练状态转战斗状态

以试飞验证过程中某次转换为例，在中间状态进行训练转战斗状态，此时发动机具体参数如图 5 所示。

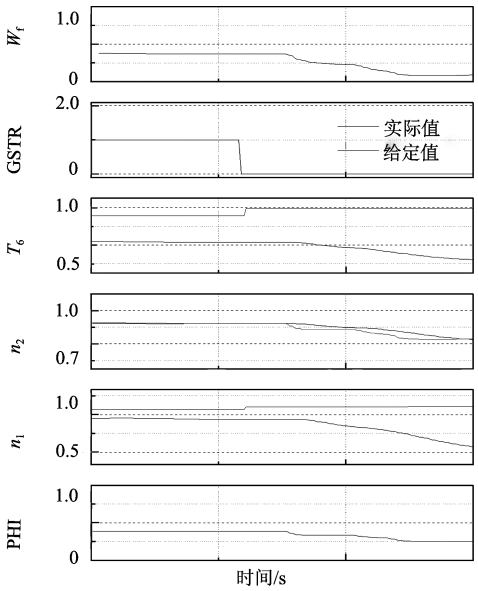

图 5 中间状态时训练转战斗状态后的各参数变化

Fig.5 Changes of parameters after training transition to combat state in intermediate state

从图中可以看出，与之前训练转战斗状态过程相比，n_1、n_2、T_6 给定均是以一个 3s 的线性过渡实现的，与控制逻辑更改相符合。转换时刻发动机处于中间状态，n_2 转速为 0.95，整个转换过程中参数过渡平稳、性能稳定，未出现失速、喘振、推力脉冲等异常现象，发动机各项数据、参数符合规定，飞机发动机工作正常，达到了预期效果。说明该方法切实可行，在中间状态取消训练转战斗状态的限制也是可以成立的。综上所述，从理论分析以及试飞验证结果可以看出，增加了转换时刻 3s 线性过渡逻辑后，可完全避免在中间状态进行战斗 / 训练转换时可能会出现的各种问题，在不影响转换性能的前提下，使得转换过程中各参数有一个平稳的过渡，且飞行员实际操纵感受良好。因此，在进行了该控制逻辑的改进后，可以放开中间状态的战斗 / 训练转换限制。

4 结论

本文对发动机战斗 / 训练状态转换潜力挖掘进行了分析及改进验证，分析结果认为该发动机战斗 / 训练状态转换在限制转速以上存在可挖掘的潜力，但对发动机工作稳定性有一定的影响。在充分论证的基础上，对中间状态转换控制逻辑进行了改进，经地面试车及飞行试验验证该措施合理有效，可放开中间状态的战斗 / 训练转换限制。该改进控制逻辑在理论分析上亦可应用于加力状态的战斗 / 训练转换过程，可以开展后续相关试验验证工作，争取实现全包线范围内的无约束操纵。

参考文献

[1] 周宗才 . 飞机推进系统控制 [M]. 西安：空军工程学院，1997.
Zhou Zongcai. Aircraft propulsion system control[M]. Xi' an：Air Force Engineering University，1997.（in Chinese）

[2] 李伟 . 战斗 / 训练状态控制对发动机热端部件寿命可靠性的影响分析 [R]. 北京：北京航空工程技术研究中心，1998.
Li Wei. Analysis of the effect of fight/train state control on the reliability of engine hot end components[R]. Beijing：Beijing Aviation Engineering Technology Research Center，1998.（in Chinese）

[3] Watts S R，Larkin L J，Hill B H，et al. Propulsion control design for a STOVL integrated flight/propulsion control system[R]. AIAA-93-486，1993.

[4] 甘晓华，刘芳，李松航 . 航空发动机战斗 / 训练状态控制研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究，2002，15（1）：24-27.
Gan Xiaohua，Liu Fang，Li Songhang. Research on aeroengine control fighting/training conditions[J]. Gas Turbine Experiment and Research，2002，15（1）：24-27.（in Chinese）

[5] 李喜发，甘晓华，刘艳梅 . 某型发动机战斗与训练状态控制技术研究 [J]. 航空动力学报，2003，18（2）：197-200.
Li Xifa，Gan Xiaohua，Liu Yanmei. Fight and train state control technique of a jet engine[J]. Journal of Aerospace Power，2003，18（2）：197-200.（in Chinese）

[6] 刘芳 . 发动机战斗 / 训练状态控制系统性能研究 [R]. 北京：北京航空工程技术研究中心，1998.
Liu Fang. Research on performance of engine fombat/train state control system[R]. Beijing：Beijing Aviation Engineering Technology Research Center，1998.（in Chinese）

作者简介

高莎莎（1991- ）女，硕士，助理工程师。主要研究方向：航空发动机工作特性试飞。

Tel：17792633208

E-mail：574640684@qq.com

Combat/Training State Transition Potential Mining Test and Evaluation Technique of Turbofan Engine

Gao Shasha*，Zhou Chao

Chinese Flight Test Establishment，Xi'an 710089，China

Abstract: Based on the improvement of fighter comprehensive combat capability and the needs of unconstrained operation，this paper analyzed the problem of high pressure speed limitation in a turbofan engine combat/training state transition. The conversion of combat and training state respectively above the conversion limit speed was researched，and the possible risks of the conversion process were analyzed and studied. On the basis of the above analysis and research，aiming at the potential risks，a modification of the control logic of intermediate state combat/training transition was made and tested on a turbofan engine. The ground test and flight test proved that the measure was reliable and effective，and it can be used in combat/training conversion in the middle state，follow-up can also be applied to the conversion in afterburner state. This paper lays the foundation for the development of combat/training state transition potential mining test of a turbofan engine and has some reference value for the development of other types of engine potential mining test and evaluation.

Key Words: turbofan engine；state transition；potential mining；control logic；flight test

Received: 2018-06-08； **Revised:** 2018-07-10； **Accepted:** 2018-08-12

***Corresponding author.Tel.:** 17792633208 **E-mail:** 574640684@qq.com