

发动机紧急状态下快速响应控制研究

薛文鹏*, 左泽敏, 魏海涛

中国飞行试验研究院 发动机所, 陕西 西安 710089

摘 要: 文中介绍了两种在紧急状态下发动机快速响应控制的方法: 调节加速度(MAS)控制和高速慢车(HSI)控制。MAS控制是修改发动机控制系统中限制器的参数值, 释放发动机加速限制, 从而获得理想的加速性能。HSI控制是提高发动机慢车状态时高压转子转速, 在紧急状态下, 大幅度缩短发动机的加速时间。仿真显示: 采用MAS控制, 发动机加速时间由原来的5.36s缩短至4.69s, 而采用HSI控制, 发动机的加速时间减小至3.82s。

关键词: 航空发动机; 紧急状态; 快速响应; MAS; HSI

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2016) 04-0037-04

航空发动机是飞机的直接动力来源,航空发动机的性能直接影响飞行的性能。在紧急状态下,发动机的性能直接关系到飞机的安全。2001年,美国AA587因尾翼折断导致飞机坠毁;2003年,DHL货机受到地面导弹袭击,导致飞机控制接口失效,机组人员仅靠调整两台发动机的推力维持机身平衡成功降落;2006年,Comair 5191航班因起飞跑道距离短而引发事故。以上事故对紧急状态下,发动机应急控制模式提出迫切需求。20世纪90年代开始,NASA就开始对飞机在紧急状态下控制系统开展研究工作。2012年,NASA在C-MAPSS40K仿真平台上,开展外部飞行环境对提升发动机性能的影响研究。尽管NASA对发动机应急控制的研究做了大量的工作,但对于飞行安全,这些工作远远不够,尤其是对紧急状态和飞机可接受的风险的评估,发动机健康状态和最大可释放裕度的评估以及发动机超限运行风险评估。这些评估的参数对于飞机性能的提升和安全至关重要。国内数字电子控制技术的发展,为

发动机紧急状态下的应急控制提供了平台和需求。

本文以双转子涡扇发动机为研究对象,研究了紧急状态下发动机快速响应的控制方法:调节加速度(Modified Acceleration Schedule,MAS)控制和高速慢车(High Speed Idle,HSI)控制。在紧急状态下,两种控制可同时参与,数字仿真显示,MAS控制和HSI控制均能缩短发动机的响应时间,提高发动机在紧急状态下的响应能力,但HSI控制比MAS控制加速的起点高,加速范围小,因而响应时间更快。

1 MAS控制

发动机过渡态的控制结构如图1所示,过渡态的加减速过程主要依靠发动机的加减速计划实现,稳态点主要依靠发动机稳态控制器实现。减速计划主要参考发动机燃烧室熄火限制,而加速计划是根据压气机喘振边界、涡轮进口温度以及保护限制确定,其目的是确保加速过程的安全和发动机的使

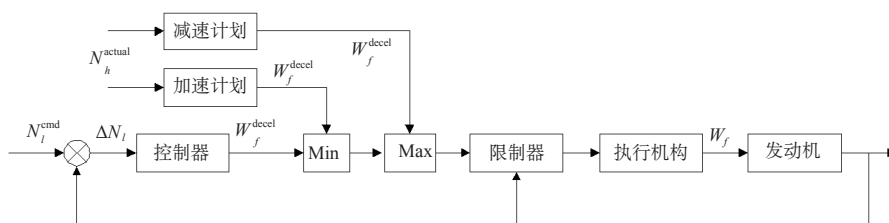


图1 发动机控制结构

Fig.1 Structure of engine control system

收稿日期: 2015-12-31; 退修日期: 2016-02-22; 录用日期: 2016-03-01

*通讯作者. Tel.: 029-86837962 E-mail: xwpfenyun@163.com

引用格式: XUE Wenpeng, ZUO Zemin, WEI Haitao. Research on fast response of turbofan in emergency situation[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016,27(04):37-40. 薛文鹏,左泽敏,魏海涛. 发动机紧急状态下快速响应控制研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(04): 37-40.

用寿命。一般情况下,发动机加速计划可表示为燃烧室供油量与发动机高压转子转速的关系。

$$\left(\frac{W_f}{P_3} \right) = f(N_h) \quad (1)$$

其中, W_f 为供油量, P_3 为高压压气机出口压力, N_h 为高压转子转速。

发动机过渡态的控制规律可表示为:

$$W_f = \min \begin{bmatrix} W_f^{\text{accel}} \\ W_f^{\text{steady}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, W_f^{accel} 为加速过程供油规律, W_f^{steady} 为稳态供油计划, 为了确保发动机的安全, 发动机的加速率受到一定的限制, 从而使得发动机的加速性能受到一定的限制, 在紧急状态下, 可以通过调节发动机加速率的限制, 快速提升发动机的性能。但通过修改发动机加速率, 减小发动机响应时间是以牺牲发动机的安全性为代价, 因此, 发动机的健康状态和可接受风险的评估变得越加重要。

图2为采用MAS控制和正常控制状态下的发动机响应曲线, 在 $t=1\text{s}$ 时, 需要发动机提供更大的推力, 改变控制需求为 106% 转速。

仿真结果显示, 在飞机推力需求改变时, MAS控制可以快速的响应控制计划的改变, 使得发动机的推力快速增大。MAS控制可以在确保发动机部件安全的情况下, 减小发动机

的响应时间, 快速跟踪发动机的控制需求。MAS控制在减小发动机加速时间的同时, 使得压气机喘振裕度减小, 增加了发动机的风险, 因此, 在进行MAS控制时, 需要在发动机喘振边界和发动机的响应时间之间进行折中。

2 HSI控制调节

高速慢车是在维持发动机慢车推力基本不变的情况下, 增加发动机的供油量, 提高发动机高压转子转速, 使发动机加速过程开始阶段具有高的转速和供油量, 从而减小过渡态的加速历程, 如图3所示。正常状态下, 发动机的慢车点A按照发动机的控制计划加速至设计点D, 而在高速慢车状态下, 发动机的慢车状态由A上移至B点, 同样按照发动机的加速计划加速至设计点, 但由于B点更靠近设计点, 由B加速至设计点过程加速范围小, 加速时间短。

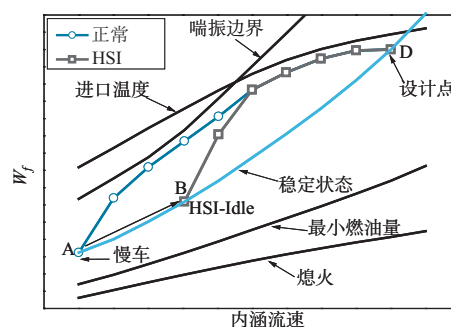


图3 HSI 控制示意

Fig.3 Diagram of HSI control

在紧急状态下, 为了减小发动机的响应时间, 提高发动机慢车状态时高压转子转速。由于高速慢车状态转子转速高, 加速范围缩短, 可以有效缩短发动机的加速时间。增加供油量使发动机高压转子转速升高的同时亦增大了低压转子转速, 这使得发动机的推力增加。推力的额外增加使得飞机的速度增大。

为了在增加发动机高压转子转速时使发动机推力基本维持不变, 可以通过增加高压压气机放气量, 降低高压压气机工作效率, 提高高压转子转速。图4为在相同的燃油流量下, 高速慢车状态与正常慢车状态时发动机参数的变化。在开环供油量一定时, 高速慢车状态下发动机低压压气机和高压压气机出口压力均减小, 发动机推力减小0.73%。而涡轮进口温度、尾喷管出口温度均升高, 其中高压转子转速升高3.7%。采用开环恒定燃油HSI控制, 可以使发动机高压转子转速升高而发动机推力基本不变。

分别采用MAS控制、HSI控制对发动机的过渡态进行仿真, 在 $t=1\text{s}$ 时, 控制需求改变为发动机最大状态, 仿真结果如图5所示。

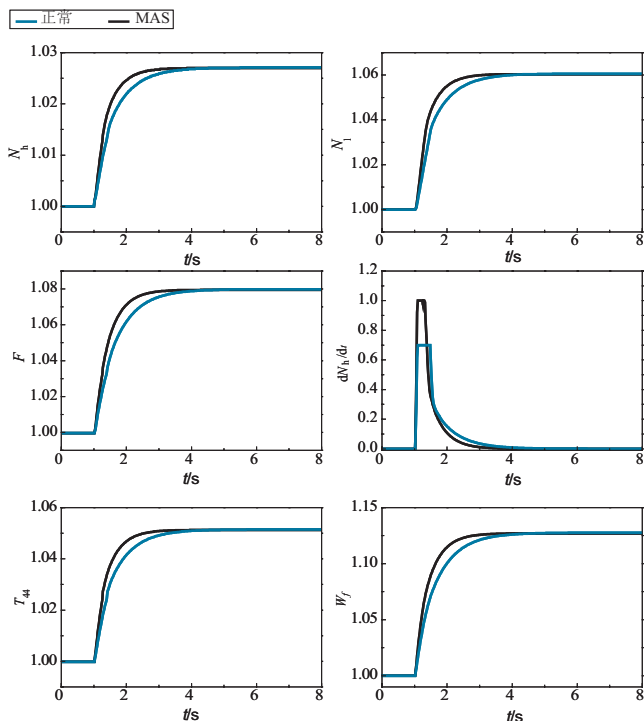


图2 正常状态、MAS发动机响应对比

Fig.2 The response of normal state and MAS control

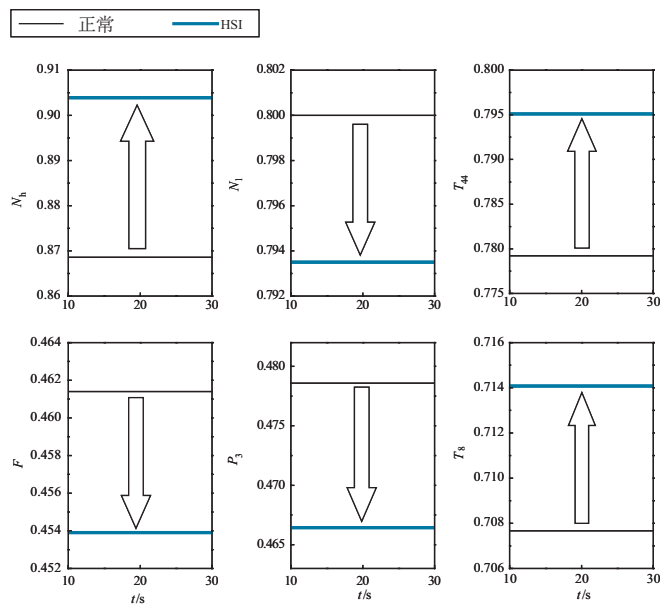


图4 开环供油量一定时高速慢车状态发动机参数变化
Fig.4 The parameters at HSI condition with constant fuel

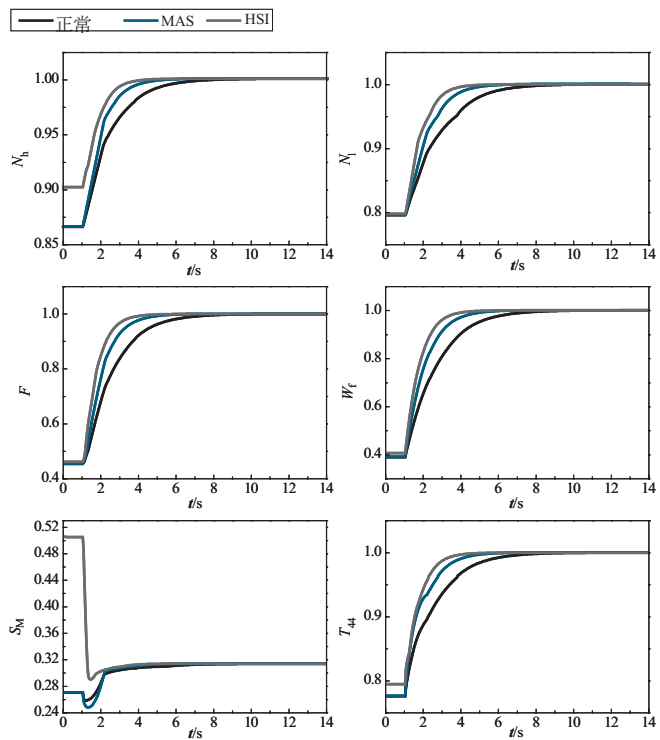


图5 闭环控制下正常状态、MAS、HSI发动机响应对比
Fig.5 Response of normal state, MAS and HSI under closed loop control

仿真结果显示,MAS控制可以缩短发动机的加速时间,但以损失压气机的稳定裕度为代价,在紧急状态下,可以通过MAS控制增强发动机的响应能力.HSI控制具有加速起点高(高压压气机转速,更大的供油量),加速范围小,压气机

表1 正常状态、MAS、HSI发动机响应时间

Table 1 The response time of Normal state, MAS and HSI under closed loop control

	T_c/s	T_{de}/s	T_s/s	T_r/s	$SM/\%$
正常	4.96	3.82	5.36	3.66	0.258
MAS	3.62	3.48	4.69	3.14	0.248
HSI	2.98	2.74	3.82	2.27	0.291

稳定裕度大的特点,可以快速提升发动机的响应能力.正常状态、MAS、HSI发动机响应时间如表1所示.其中 T_c 为控制需求改变到转速跟踪至需求转速的63.2%的时间; T_{de} 为控制需求改变到转速跟踪至需求转速的50%的时间; T_s 为调节时间,表示转速跟踪误差至期望转速2%以内的时间; T_r 为上升时间,表示转速从10%跟踪至90%的时间.表中得知.HSI控制时,发动机的响应调节时间减小28.73%,上升时间减小38%,发动机稳定裕度增加至0.2904,增加12.4%。

3 结论

文中以双转子涡扇发动机为研究对象,分析研究了发动机在紧急状态下的快速响应控制:MAS控制和HSI控制。

在紧急状态下,MAS控制系统可以缩短发动机的加速时间,提升发动机的性能,但损失了发动机的稳定裕度。

HSI控制通过提高慢车状态时高压转子转速,具有加速起点高,加速范围小,压气机稳定裕度大的特点,在过渡过程可以显著提高发动机的加速性能,缩短发动机的加速时间。

AST

参考文献

- [1] Jonathan L. Enhanced engine control for emergency operation[Z]. NASA Glenn Research Center, 2012.
- [2] Csank J T, Chin J C, May R D, et al. Implementation of enhanced propulsion control modes for emergency flight operation[Z]. NASA/TM-2011-217038, 2011.
- [3] Csank J T, May R D, Jonathan L, et al. A sensitivity study of commercial aircraft engine response for emergency situations[Z], NASA/TM-2011-217004, 2011.
- [4] Csank J T, May R D, Gou T, et al. The effect of faster engine response on the lateral directional control of a damaged aircraft [Z], NASA/TM-2012-217216, 2012.
- [5] Hunter G W, Lekki J D, Simon D L. Development and testing of propulsion health management[Z]. NASA/Glenn Research Center, 2012.
- [6] 张书刚,郭迎清,陈小磊. 航空发动机故障诊断系统性能评价

- 与仿真验证[J]. 推进技术, 2013, 8(34): 1121-1127.
- ZHANG Shugang, GUO Yingqing, CHEN Xiaolei. Performance evaluation and simulation validation of fault diagnosis system for aircraft engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 8(34): 1121-1127. (in Chinese)
- [7] 薛薇, 郭迎清, 李睿. 航空发动机状态监视、故障诊断研究及验证[J]. 推进技术, 2011, 32(2): 271-275.
- XUE Wei, GUO Yingqing, LI Rui. Algorithm and experimental validation for condition monitoring, fault detection for gas turbine engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(2): 271-275. (in Chinese)
- [8] Simon D L. An integrated architecture for on-board aircraft engine performance trend monitoring and gas path fault diagnostics[Z]. NASA/TM-2010-216358, 2010.
- [9] YUAN Liu. Application and evaluation of control modes for risk-based engine performance enhancements[J]. AIAA-2014-3637, 2014.
- [10] Litt J, Sowers T, Owen A, et al. Flight simulator evaluation of enhanced propulsion control modes for emergency operation[J]. NASA/TM-2012-217698, 2012.
- [11] Seele R, Graff E, Lin J, et al. Performance enhancement of a vertical tail model with sweeping jet actuators[J]. AIAA-2013-0411, 2013.
- [12] Gaudet S R. Development of a dynamic modeling and control system design methodology for gas turbines[D]. Carleton University Ottawa, 2007.
- [13] Chapman J W, Lavelle T M, May R D, et al. Propulsion system simulation using the toolbox for the modeling and analysis of thermodynamic systems[J]. AIAA-2014-3929, 2014.
- [14] Rebosio F, Widenhorn A, Noll B, et al. Numerical simulation of a gas turbine model combustor operated near the lean extinction limit[J]. ASME GT2010-22751, 2010.
- [15] May R D, Csank J, Lavelle T M, et al. A high-fidelity simulation of a generic commercial aircraft engine and controller[J]. AIAA-2010-6630, 2010.
- [16] Csank J, May R D, Litt J S, et al. Control design for a generic commercial aircraft engine[J]. AIAA-2010-6629, 2010.
- [17] Burcham Jr F W, Fullerton C G, Maine T A. Manual manipulation of engine throttles for emergency flight control[Z]. NASA/TM-2004-212045. 2004.
- [18] Litt J S, Frederick D K, Guo T H. The case for intelligent propulsion control for fast engine[J]. AIAA-2009-1876, 2009.
- [19] Litt J S, Sharp L M, Guo T H. A risk assessment architecture for enhanced engine operation[J]. AIAA-2010-3469, 2010.
- [20] Guo T H, Litt J S. Risk management for intelligent fast engine response control[J]. AIAA-2009-1873, 2009.

作者简介

薛文鹏(1987—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 航空发动机建模与控制系统仿真。

Tel: 029-86837962

E-mail: xwpfenyun@163.com

Research on Fast Response of Turbofan in Emergency Situation

XUE Wenpeng*, ZUO Zemin, WEI Haitao

China Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China

Abstract: Modified acceleration schedule (MAS) and high speed idle (HSI) control which was applied in the process of fast response of engine dynamic were described. By modifying the parameters of the limiter in engine control system, release the acceleration constraint, satisfactory performance can be obtained through MAS. And HSI is by raising the speed of HP rotor in idling condition, decreases the acceleration time in emergency. Simulation results show that: settling time was shortened from 5.36s to 4.69s in the MAS control while reached 3.62s in HSI control.

Key Words: emergency; fast response; MAS; HSI

Received: 2015-12-31; Revised: 2016-02-22; Accepted: 2016-03-01

*Corresponding author. Tel.: 029-86837962 E-mail: xwpfenyun@163.com