

1 种新型燃油分配方案设计

吴吉麟¹, 陈斐¹, 朱佳慧², 李明磊¹, 金林山¹

(1. 中国航发控制系统研究所, 江苏无锡 214063; 2. 无锡市运河实验中学, 江苏无锡 214000)

摘要: 针对航空发动机分级燃烧燃油分配的高精度、变比例需求, 提出了1种基于主、副油路分路计量的新型燃油分配设计方案, 并对该方案进行了理论分析以及仿真和试验验证。结果表明: 该方案的燃油分配精度高, 燃油分配比例调节灵活, 可以满足发动机日益复杂的低污染设计和控制的需求; 在主、副油路同时供油时, 燃油分配最小比例与泵后压力负相关, 与副油路喷嘴节流特性正相关。

关键词: 燃油分配; 分级燃烧; 调节器; 燃油计量; 航空发动机

中图分类号: V233.7+53

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.03.010

Design of a New Fuel Distribution Scheme

WU Ji-lin¹, CHEN Fei¹, ZHU Jia-hui², LI Ming-lei¹, JIN Lin-shan¹

(1. AECC Aero Engine Control System Institute, Wuxi Jiangsu 214063, China; 2. Wuxi Yunhe Experimental Middle School, Wuxi Jiangsu 214100, China)

Abstract: Aiming at the requirement of high precision and variable proportion of fuel distribution in fractional combustion of engine, a new type of fuel distribution design scheme was put forward based on shunt metering of the main and pilot fuel passage, and the theoretical analysis, simulation and test verification of the scheme were carried out. The results show that the fuel distribution accuracy is high and fuel distribution ratio adjustment is flexible of the scheme, which can meet the increasingly complex low emission design and control requirements of the engine. The minimum proportion of fuel distribution is negatively correlated with the pump discharge pressure and positively correlated with the nozzle restriction characteristics of the pilot fuel passage when the main and pilot fuel passage are supplied simultaneously.

Key words: fuel distribution; fractional combustion; adjuster; fuel metering; aeroengine

0 引言

为了满足发动机的污染排放要求, 国外已经研制出一系列先进的高性能、低排放燃烧室, 如 GE 公司研制出用于 CFM56 发动机的双环腔低污染燃烧室 (Dual Annular Combustor, DAC) 以及采用贫油直接混合燃烧技术 (Lean Direct Mixing, LDM) 为其 GENx 发动机研制的双环预混旋流燃烧室 (Twin Annular Premixing Swirler, TAPS)。在这些研究中, 燃烧室分区或分级燃烧技术是基础^[1-6]。而徐丽等^[7]、姚照辉等^[8]、程明等^[9]、张军龙^[10]的研究表明, 对于结构确定的发动机, 2 级燃油分配比例直接影响发动机内流道的流程

参数分布、燃烧模态、温度场分布, 从而影响发动机的燃烧性能及排放物比例。因此, 燃油分配技术又是燃烧室分区或分级燃烧技术的基础。燃油分配技术就是根据发动机燃烧室在不同工况下的燃油分级工作需求, 自动控制燃油流量的分配, 使得燃烧室的燃烧效率与污染排放物性能最佳, 从而充分提高发动机使用的经济性和低污染性, 实现发动机的最优控制。

随着发动机低污染设计技术的发展和控制技术的进步, 发动机分级燃烧对于燃油分配高精度变比例的要求也逐渐提高, 对应的燃油分配技术研究也势在必行。目前国内对于燃油分配器的研究较少, 且都围

收稿日期: 2019-02-06 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 吴吉麟(1988), 男, 硕士, 工程师, 从事燃油与作动系统总体设计工作; E-mail: zijinwenxiang@126.com。

引用格式: 吴吉麟, 陈斐, 朱佳慧, 等. 1 种新型燃油分配方案设计[J]. 航空发动机, 2020, 46(3): 54-58. WU Jilin, CHEN Fei, ZHU Jiahui, et al. Design of a new fuel distribution scheme[J]. Aeroengine, 2020, 46(3): 54-58.

于传统的燃油分配方案^[11-15]。

本文设计了1种可以根据发动机工况的需要自动调整燃油分配比例,用于燃油分级燃烧的新型燃油分配方案。

1 传统燃油分配方案

1.1 传统机械式燃油分配方案

传统机械式燃油分配方案原理如图1所示。通过来油压力与控制腔燃油压力、弹簧力的平衡来调节燃油分配阀的型孔大小。当控制腔燃油压力与弹簧力之和大于来油压力时,燃油分配阀完全关闭,主、副油路均不供油;当来油压力大于控制腔燃油压力与弹簧力之和时,燃油分配阀阀芯右移(此时弹簧力也会逐渐增大),首先打开副油路供油,随着来油压力逐渐增大,燃油分配阀阀芯继续右移,打开主油路供油,此时主、副油路同时供油,燃油分配比例(主油路流量与主、副油路流量之和之比)由分配阀型孔和主、副油路喷嘴特性决定。

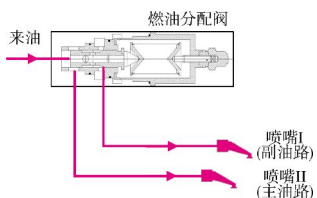


图1 传统机械式燃油分配方案

在该方案中,燃油分配阀的型孔位置主要受油源压力和弹簧性能参数的影响,因此燃油分配特性比较固化,而且易受来油压力扰动的影响,分配精度不高。同时,弹簧作为弹性敏感元件,其特性易受温度、工作疲劳的影响而产生变化,影响燃油的分配特性。

1.2 传统电控式燃油分配方案

传统电控式燃油分配方案原理如图2所示。从图中可见,传统电控式燃油分配方案,在燃油分配阀未打开之前,仅由副油路供油;燃油分配阀打开以后,由主、副油路同时供油,燃油分配比例由分配阀型孔和主、副油路喷嘴特性决定。

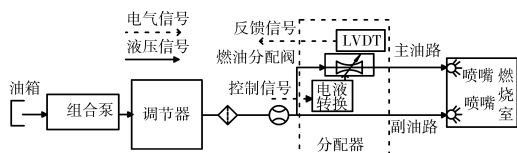


图2 传统电控式燃油分配方案

在该方案中,在燃油分配阀的型孔位置由控制器通过电液转换元件将电气控制信号转换为液压控制信号进行控制,并通过直线位移传感器线性可变差动变压器(Linear Variable Differential Transformer,

LVDT)将燃油分配阀的位置信号反馈给控制器,形成燃油分配阀的位置闭环控制。因此该方案的燃油分配特性比较灵活,可以通过控制器的算法改变燃油分配比例,方便满足燃烧室的分级燃烧比例需求。但由于燃油分配比例与燃油分配阀的位置不是线性关系,因此使用差值算法时必然会带入对应的误差,这主要由控制算法中的差值密度、线性度决定。通常在燃油分配阀位置控制精度为 $\pm 2\%$ 的情况下,可实现的燃油分配精度为 $\pm 5\%$ 左右。但在燃油分配比例较小的状态下,该方案分配比例的控制精度受主、副油路特性的影响一般会比较低。

2 新型燃油分配方案设计

新型燃油分配方案原理如图3所示。主油路和副油路流量各采用1个调节器进行供油,燃油流量分配比例由主、副油路的计量流量决定。这种采用1个燃油泵加多路燃油调节的燃油分配供油方式在加力燃烧和超燃冲压燃油控制方案中也是常见的^[16-17]。

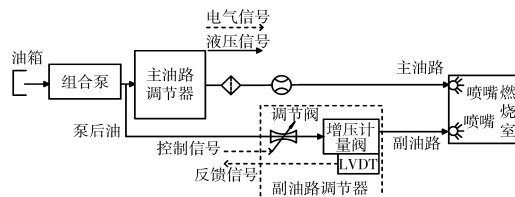


图3 新型燃油分配方案

对比传统的燃油分配方案可知,新的燃油分配方案不再局限于对某一特定来油进行分配,而是直接根据主、副油路燃油流量需求进行调节,将燃油分配比例的控制转换为燃油计量流量的控制,分配精度由燃油计量精度决定。由于主、副油路均采用独立调节器控制,燃油流量均可实现较高精度计量,可以达到更高的燃油分配精度。通常燃油计量精度可以达到 $\pm 2.5\%$,对应的燃油分配比例精度为 $\pm 3.5\%$ 左右。但由于主、副油路调节器油源均为同一泵后油源,因此需要考虑2路调节器耦合带来的影响。

为了研究该方案的特性和可行性,对该方案开展分析、仿真和试验验证。

3 分析与仿真

3.1 燃油分配方案分析

在方案中主油路调节器采用传统燃油计量方式即可,主要对副油路调节器及其与主油路调节器耦合

后的影响进行分析。副油路调节器燃油流量调节原理如图4所示。

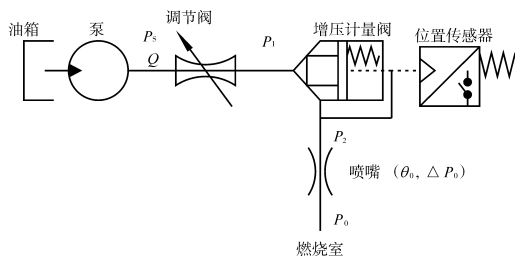


图4 副油路调节器燃油流量调节原理

在副油路调节器燃油流量调节方案中,采用压差节流的方式进行燃油计量,泵后压力是实现稳定调节的主要因素,因此,泵的供油应为压力油源,最好采用离心泵。

增压计量阀是副油路调节的关键部件,当该阀稳定工作时,计前油压力、计后油压力与弹簧力之和平衡,即

$$P_1 A = P_2 A + k(L_0 + X) \quad (1)$$

式中: P_1 为计前油压力; P_2 为计后油压力; A 为计前油和计后油作用腔面积; k 为弹簧刚度系数; L_0 为弹簧在活门初始位置(关闭)时的压缩长度; X 为活门打开位移。

由此可得

$$(P_1 - P_2) = k(L_0 + X)/A \quad (2)$$

将式(2)代入小孔节流公式得

$$Q = C_d W X \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (3)$$

式中: Q 为经过节流小孔的燃油流量; C_d 为燃油流量系数; W 为节流小孔的面积梯度; ρ 为燃油流量密度。

$$\begin{aligned} Q &= C_d W X \sqrt{\frac{2k(L_0 + X)}{\rho A}} \\ &= C_d W (L_0 + X) \sqrt{\frac{2k(L_0 + X)}{\rho A}} - C_d W L_0 \sqrt{\frac{2k(L_0 + X)}{\rho A}} \\ &= C_d W X' \sqrt{\frac{2kX'}{\rho A}} - C_d W L_0 \sqrt{\frac{2kX'}{\rho A}} \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $X' = L_0 + X$ 。

由此得到经过增压计量阀的燃油流量与阀芯位移的单位增益曲线(取 $L_0 = 0.003$)如图5所示。燃油流量与阀芯位置一一对应,因此燃油流量调节可以对应地转换为增压计量

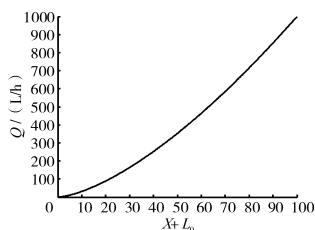


图5 燃油流量与阀芯位移的单位增益曲线

阀的阀芯位置调节。通过在增压计量阀上安装位置传感器就可以实现阀芯的位置闭环控制,从而提高流量计量精度。

对于发动机某特定工况下主、副油路给定需求流量,其泵后压力 P_s 和副油路喷嘴压降是确定的,增压计量阀的阀芯位置和计量前后压差是确定的。因此,要使增压计量阀位置调整到副油路所需流量位置,需要通过调整调节阀两端的压降来实现。当调小调节阀过流面积时,调节阀两端压降增大,增压计量阀两端压降减小,为了维持平衡,关小增压计量阀,即对应地减小流量。反之亦然。

调节阀理论调节过流面积范围为 $[0, +\infty)$,当过流面积为0时,对应副油路流量为0,此时燃油分配比例为1;当过流面积为 $+\infty$ 时,可以看做调节阀两端压降为0,此时有(假设副油路喷嘴特性为压差 ΔP_0 对应流量 Q_0)

$$P_s - P_0 = P_1 - P_2 + P_2 - P_0 \quad (5)$$

$$P_2 - P_0 = \frac{Q^2 \cdot \Delta P_0}{Q_0^2} \quad (6)$$

结合式(2)、(4)可得

$$P_s - P_0 = \frac{\Delta P_0 C_d^2 W^2 X^2 \cdot 2k(L_0 + X)}{Q_0 \rho A} + \frac{k(L_0 + X)}{A} = ax^3 + aL_0 x^2 + bx + bL_0 - P_s + P_0 \quad (7)$$

其中: a, b 均为正数,令 $f(X) = ax^3 + aL_0 x^2 + bx + bL_0 - P_s + P_0$,易得 $f(0) = bL_0 - P_s + P_0 < 0, f(X) > 0$

由此可知,此时方程有且仅有惟一解,此解与副油路喷嘴特性、泵后压力 P_s 有关。当主油路流量为0,仅由副油路供油时,燃油分配比例为0。

由上述分析可知,当仅由副油路供油时,燃油分配比例为0;当仅由主油路供油时,燃油分配比例为1;当主、副油路同时供油时,燃油分配比例最大值接近1,最小值受副油路喷嘴特性和泵后压力影响,与泵后压力负相关,与副油路喷嘴节流特性正相关。

3.2 燃油分配方案仿真建模

利用AMESim软件对燃油分配方案进行建模,如图6所示。

在主油路调节固定的条件下,对副油路调节阀从最小开口到最大开口进行仿真,仿真结果如图7所示。

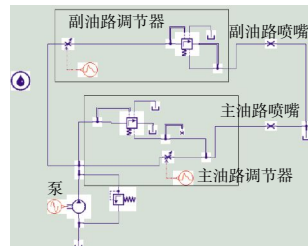


图6 新型燃油分配方案模型

由仿真结果可知,在主油路调节器状态固定时,

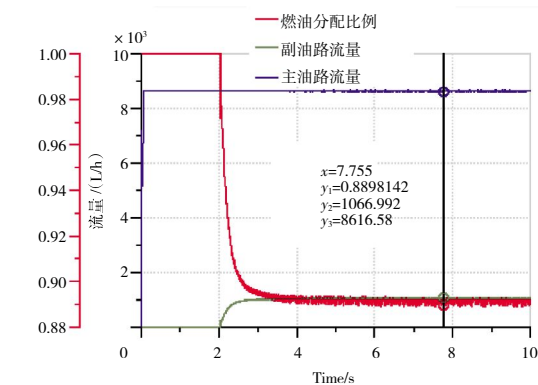


图 7 主调节器对副油路调节器影响(主油路调节固定)

副油路调节器的调节只改变副油路的流量,不影响主油路调节器控制。由于仿真中泵后压力由主燃油喷嘴特性决定,因此,该方案的最终分配比例与主、副油路喷嘴特性比例(约 0.894)非常接近。

在副油路调节固定的条件下,将主油路调节阀从最小开口到最大开口进行仿真,其仿真结果如图 8 所示。

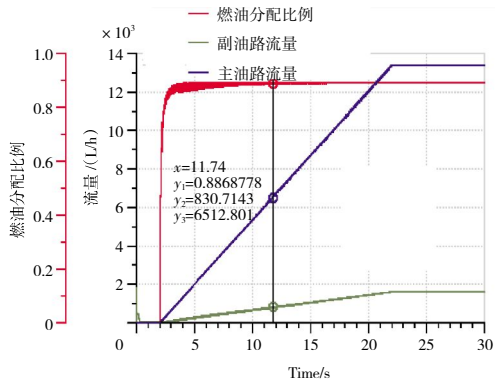


图 8 主调节器对副油路调节器影响(副油路调节固定)

从图中可见,保证副油路调节器不变时,主油路调节器的变化会影响副油路调节器的变化,主要是由于主油路调节器供油流量改变会影响泵后压力的大小,从而影响副油路调节器供油流量的大小。说明副油路调节器容易受泵后压力的影响,同时也说明在实际选择泵时,可以不使用离心泵,而采用定量泵或者变量泵。

同时,根据仿真结果中主油路和副油路燃油流量变化的线性度可知,在副油路调节固定的条件下,燃油分配比例保持不变(约为 0.887)。

主、副油路调节器不变时,增加泵后压力扰动,其仿真结果如图 9 所示。

从图中可见,当泵后压力存在扰动时,会对副油

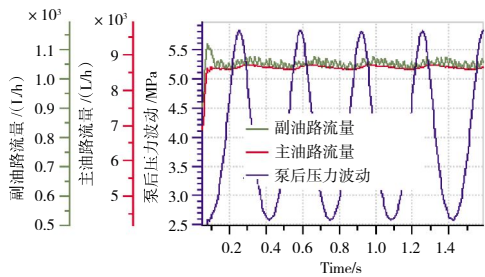


图 9 泵后压力波动对主、副油路调节器的影响

路调节器产生一定影响,在泵后压力为 (4.5 ± 2) MPa 的压力脉动下,副油路流量波动为 (1050 ± 20) L/h,泵后压力脉动的影响不会太大。

4 试验验证

以某型发动机燃油调节器为主调节器进行改造,增加副油路调节器设计工装进行验证。对不同工况下副油路计量特性进行测试,结果见表 1。

表 1 不同工况下副油路计量流量					
位置 $I(^{\circ})$	流量 $I(\text{kg/h})$		位置 $I(^{\circ})$	流量 $I(\text{kg/h})$	
	工况 1	工况 2		工况 1	工况 2
47	350	361	60	540	559
48	360	375	62	575	587
49	380	389	64	610	619
51	400	420	66	643	649
53	425	446	70	695	710
55	470	477	75	800	795
56	480	494	80	882	880
58	520	524			

注:工况 1 测试条件:泵后压力为 3.75 MPa,主油路流量为 1500 kg/h;
工况 2 测试条件:泵后压力为 4.45 MPa,主油路流量为 4740 kg/h。

对上述测试结果进行一致性分析,得到副油路流量随位置的变化曲线,如图 10 所示。

由测试结果可知,对主、副油路分别计量的燃油分配方案可行,且副油路调节器的流量特性与理论分析结果吻合。

5 结论

(1)通过仿真分析和试验验证结果可知,采用主、副油路独立计量调节的新型燃油分配方案具有燃油

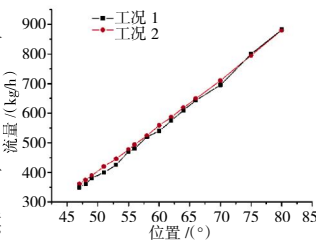


图 10 副油路流量随位置的变化曲线

分配精度高,燃油分配比例调节灵活的特点。

(2)在分析时发现,主、副油路独立燃油计量调节的方式可以根据燃油系统架构需要进行选取,但不能都选用压差回油的方式。出于验证的便利,本轮试验验证中主油路采用了压差回油的燃油计量调节方式,副油路采用了压差节流的燃油计量调节方式。

(3)新型燃油分配方案为燃油系统架构设计提供了更多的选择,本文关于新型燃油分配方案的理论分析和验证方法可用于指导实际工程设计和应用。

参考文献:

- [1] 彭云晖,许全宏,张弛,等.我国大飞机发动机低污染燃烧室发展考虑[C]//中国航空学会2007年学术年会论文集.深圳:中国航空学会,2007:1-7.
PENG Yunhui, XU Quanhong, ZHANG Chi, et al. Development consideration of low pollution combustion chamber for large aircraft engines in China [C]//Proceedings of 2007 annual meeting of Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Shenzhen: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2007: 1-7. (in Chinese)
- [2] 梁春华,尚守堂.大飞机发动机先进低排放燃烧室技术[J].航空制造技术,2010(14):40-43.
LIANG Chunhua, SHANG Shoutang. Advanced low emission combustor technologies for large commercial aircraft engine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(14): 40-43. (in Chinese)
- [3] 赵坚行.民用发动机污染排放及低污染燃烧技术发展趋势[J].航空动力学报,2008(6):986-994.
ZHAO Jianxing. Pollutant emission and development of low-emission combustion technology for civil aero engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2008(6): 986-994. (in Chinese)
- [4] 刘静,肇俊武.国外民用航空发动机低污染燃烧室的发展[J].航空发动机,2012,38(4):11-16.
LIU Jing, ZHAO Junwu. Development of low emission combustor for foreign civil aeroengine [J]. Aeroengine, 2012, 38 (4): 11-16. (in Chinese)
- [5] 许全宏,张弛,林宇震. ICAO 最新民机排放目标对我国低污染燃烧室发展的影响[J].国际航空,2009(8):72-73.
XU Quanhong, ZHANG Chi, LIN Yuzhen. ICAO CAEP's new goal and the effect on China[J]. International Aviation, 2009(8): 72-73. (in Chinese)
- [6] 王海鹰,胡忠志,殷锴,等.应用于低污染燃烧的1种燃油分配技术研究[J].航空发动机,2013,39(6):49-52.
WANG Haiying, HU Zhongzhi, YIN Kai, et al. Investigation on a fuel distribution technology for low emission combustion [J]. Aeroengine, 2013, 39(6): 49-52. (in Chinese)
- [7] 徐丽,刘凯.燃料分配对燃气轮机燃烧室燃烧特性影响的研究[J].沈阳理工大学学报,2012,31(2):38-41.
XU Li, LIU Kai. Study on combustion characteristics of fuel distribution of gas turbine combustor [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2012, 31(2): 38-41. (in Chinese)
- [8] 姚照辉,李光熙,张蒙正,等.燃油分配对超燃冲压发动机的性能影响仿真分析[J].火箭推进,2013,39(4):30-35.
YAO Zhaohui, LI Guangxi, ZHANG Mengzheng, et al. Simulation and analysis for influence of fuel distribution on scramjet performance [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(4): 30-35. (in Chinese)
- [9] 程明,尚守堂,刘殿春,等.燃油分级比例对TAPS燃烧室性能的影响[J].航空发动机,2012,38(4):6-10.
CHENG Ming, SHANG Shoutang, LIU Dianchun, et al. Influence of fuel-staging ratio on TAPS combustor performance [J]. Aeroengine, 2012, 38(4): 6-10. (in Chinese)
- [10] 张军龙.支板/壁面燃油分配对超声速燃烧室燃烧性能的影响[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
ZHANG Junlong. Combustion characteristics in supersonic combustor equipped with strut/wall fuel injection [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] 唐强,叶志锋.分级燃烧燃油分配器的设计与仿真[J].重庆理工大学学报,2013,27(4):40-44.
TANG Qiang, YE Zhifeng. Design and simulation on the fuel distributor of stage combustion [J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2013, 27(4): 40-44. (in Chinese)
- [12] 李鑫,张荣,叶志锋.用于分级燃烧的高性能燃油分配器的改进设计与仿真[J].航空发动机,2016,42(5):38-42.
LI Xin, ZHANG Rong, YE Zhifeng. Improved design and simulation of high performance fuel distributor for staged combustion [J]. Aeroengine, 2016, 42(5): 38-42. (in Chinese)
- [13] 唐强.面向分级燃烧的发动机燃油控制系统设计[D].南京:南京航空航天大学,2012.
TANG Qiang. Research on aircraft engine fuel control system for stage combustion [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [14] 彭凯,樊丁,卜振鹏,等.航空发动机燃油分布器故障分析与参数优化[J].推进技术,2011,32(2):276-281.
PENG Kai, FAN Ding, BU Zhenpeng, et al. Failure analysis and parameter optimization for fuel distributor for aeroengine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(2): 276-281. (in Chinese)
- [15] 卜振鹏,樊丁,彭凯.发动机燃油分布器性能异常仿真分析[J].计算机仿真,2011,42(5):38-42.
BU Zhenpeng, FAN Ding, PENG Kai. Abnormal performance simulation analysis for engine fuel distribution [J]. Computer Simulation, 2011, 42(5): 38-42. (in Chinese)
- [16] 樊思齐.航空发动机控制(下册)[M].西安:西北工业大学出版社,2008:510-519.
FAN Siqi. Aero engine control (volume two) [M]. Xi'an: Northwest University of Technology Press, 2008: 510-519. (in Chinese)
- [17] 谢寿生. A Π - 31 Φ 加力涡扇发动机[M].西安:空军工程大学出版社,2002:104-127.
XIE Shousheng. A Π - 31 Φ afterburner turbofan engine [M]. Xi'an: Air Force Engineering University Press, 2002: 104-127. (in Chinese)

(编辑:刘静)