

应用于低污染燃烧的 1 种燃油分配技术研究

王海鹰, 胡忠志, 殷 锴, 李宇宸, 马 翔
(中航工业商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)



王海鹰(1984), 女, 工程师, 硕士, 从事
航空发动机控制系统设计工作。

收稿日期: 2012-11-10

摘要: 针对民用航空发动机低污染排放要求日益严格的现状及低污染燃烧技术发展的需要, 研究了 1 种应用于低污染燃烧领域的燃油分配技术。阐述了该燃油分配系统的结构, 包括燃油系统和燃油分配器的结构及控制回路的结构和原理; 利用 AMESim 软件对该系统进行了数值建模仿真, 通过分析燃油分配器分级活门打开与关闭 2 种情况下燃烧室预燃区和主燃区燃油分配量与燃油分配器分配活门开度的关系, 得出了燃烧室预燃区和主燃区燃油的分配关系曲线; 根据仿真分析结果, 从发动机控制回路出发, 引出了燃油分配的控制逻辑。研究结果表明: 该燃油分配系统能够对进入发动机燃烧室预燃区和主燃区的燃油进行精确的分配控制, 满足低污染燃烧技术对燃油分配的要求。

关键词: 燃油分配; 低污染燃烧; 燃油系统; 航空发动机

Investigation on a Fuel Distribution Technology for Low Emission Combustion

WANG Hai-ying, HU Zhong-zhi, YIN Kai, LI Yu-chen, MA Xiang
(AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: Aiming at the status of strict emission standards for civil aeroengine and the development requirement of low emission combustion, a fuel distribution technique was introduced to be applied on low emission combustion field. The structure of the fuel distribution system was described, including structures of the fuel system and the fuel distributor, the principle and structure of the fuel control loop. The system was modeled and simulated by AMESim software. The trends of fuel flow distribution into the pilot combustion zone and the main combustion zone was given by analyzing the relation ship between fuel flow of the two combustion zones and the opening level of the fuel split valve while the fuel stage valve was either open or closed. The control logic of fuel distribution was developed from the engine control loop based on the analysis result. The result shows that the fuel spilt system is fully capable of controlling the fuel flows into the pilot combustion zone and the main combustion zone, and the low emission combustion requirement is fully satisfied.

Key words: fuel distribution; low emission combustion; fuel system; aeroengine

0 引言

人们已经意识到航空运输带来便捷的同时, 也给人类的生存环境带来了污染问题。国际民航组织(ICAO)就此制定了日益严格的航空污染物排放标准, 于 1986、1993、1996 和 2004 年陆续颁布了 CAEP1、CAEP2、CAEP4 和 CAEP6 标准。为此, 各大发动机公司纷纷开展了低污染燃烧技术的研究, 如 GE 公司研制的双环预混旋流(TAPS)燃烧室、PW 公司发展的 TALON X 燃烧室以及 RR 公司的 ANTLE 燃烧室^[1-2]。

要进入民用航空领域, 就必须达到国际民航组织

的污染排放规定。中国民用航空发动机事业刚刚起步, 航空发动机相关高校和研究所也开展了低污染燃烧室的研究, 并取得了一定的成果^[3-5]。在对先进低污染燃烧室研制中, 分区分级燃烧技术构成了低污染燃烧室设计的技术基础。根据 NO_x 与 CO 产生的机理及试验结果可知: 燃烧室主燃烧区当量比在 0.6~0.8 范围内产生的 NO_x 与 CO 很少^[6]。因此, 要达到低污染燃烧的目的就必须要对进入燃烧室燃烧区的燃油进行精确的分配控制。目前, 国内民用航空发动机燃油分配技术的研究还是空白, 为此, 本文着重研究了 1 种应用于低污染燃烧领域的燃油分配技术。

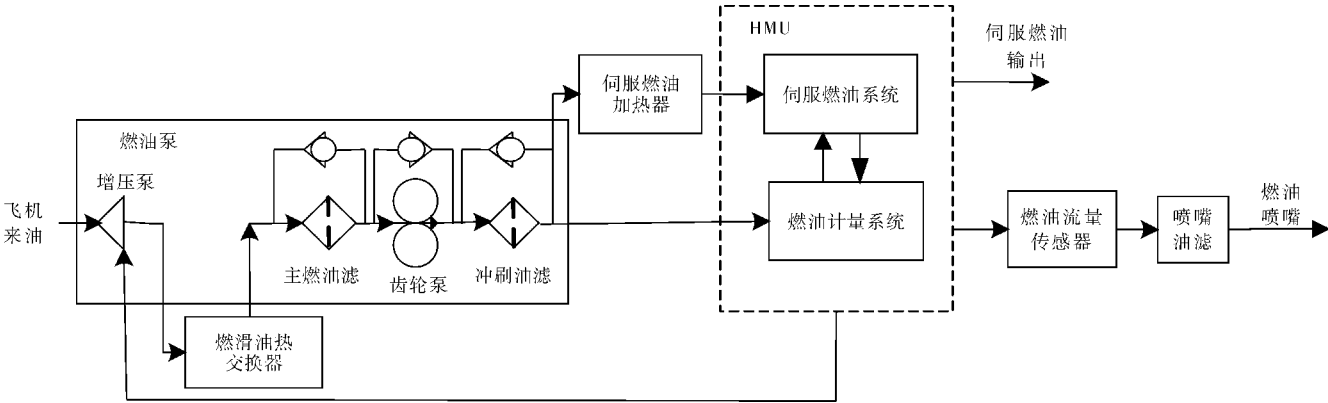


图 1 某典型民用航空发动机燃油系统

1 发动机燃油分配系统

1.1 发动机燃油系统

要对进入发动机燃烧室的燃油进行分配控制,首先,需要了解发动机燃油系统结构(如图 1 所示)。现代民用航空发动机燃油系统普遍采用类似于图 1 的 2 级燃油泵和液压机械装置 (Hydro-Mechanical Unit, HMU) 的组合结构。燃油泵分为 2 级——增压泵和齿轮泵,飞机来油首先进入增压泵,从增压泵出来后进入燃滑油热交换器,从燃滑油热交换器回到燃油泵后通过主燃油滤进入齿轮泵,齿轮泵出口分 2 路:一路经自洗油滤和伺服燃油加热器后进入 HMU 的伺服燃油系统,用于伺服控制;另一路进入 HMU 的燃油计量系统,计量后的燃油经过燃油流量传感器、喷嘴油滤和燃油喷嘴后进入发动机燃烧室。

本文研究的低污染燃烧发动机的燃油系统与如图 1 所示的系统略有差别——在喷嘴油滤后增加 1 个燃油分配器,其作用是将 HMU 计量后的燃油按照要求分配至燃烧室各燃烧区,以满足低污染燃烧的要求。

1.2 燃油分配系统结构

燃油分配系统由燃油分配器和集成在燃烧室头部的燃油喷嘴组成。燃烧室采用 1 种贫油预混预蒸发低污染燃烧室,由 12 个头部和火焰筒组成。燃烧空气全部由燃烧室头部供入,冷却空气和掺混空气则从火焰筒进入。燃烧室头部结构如图 2 所示,从图中可见,其采用双环腔结构,分为预燃级和主燃级 2 级,预燃级在内,主燃级环绕着预燃级。

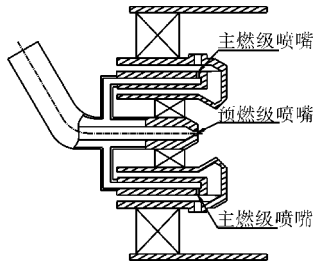


图 2 燃烧室头部结构

为提高喷雾质量,降低污染排放,将主燃级分为

2 级——主燃级第 1 级和主燃级第 2 级。在发动机小工况时仅预燃级供油,在中等工况时预燃级和主燃级第 1 级供油,在大工况时预燃级、主燃级第 1 级和主燃级第 2 级同时供油。12 个头部中主燃级第 1 级和主燃级第 2 级间隔出现,燃油分配系统结构如图 3 所示。进入燃烧室的总流量由 HMU 计量,燃油分配器将 HMU 计量后的燃油分为预燃级、主燃级第 1 级和主燃级第 2 级后,供往发动机燃烧室。主燃级与预燃级的燃油分配关系为连续可调,在主燃级供油的情况下,主燃级第 2 级应能进行通断调节。

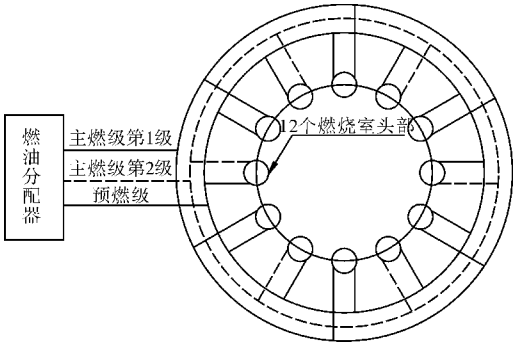


图 3 燃油分配系统结构

燃油分配器结构如图 4 所示,主要由燃油分配活门、燃油分级活门、燃油分配活门控制用电液伺服阀、燃油分配活门位置传感器、燃油分级活门控制用电磁阀、燃油分级活门接近开关组成。计量燃油进入燃油分配器后,首先分成预燃级和主燃级 2 路,预燃级不加控制直接进入预燃级燃油喷嘴,主燃级经燃油分配活门后分成主燃级第 1 级和主燃级第 2 级,主燃级第 1 级直接进入主燃级第 1 级燃油喷嘴,主燃级第 2 级经燃油分级活门后进入主燃级第 2 级燃油喷嘴。HMU 提供燃油分配器控制所需的高压和低压 2 股伺服油。

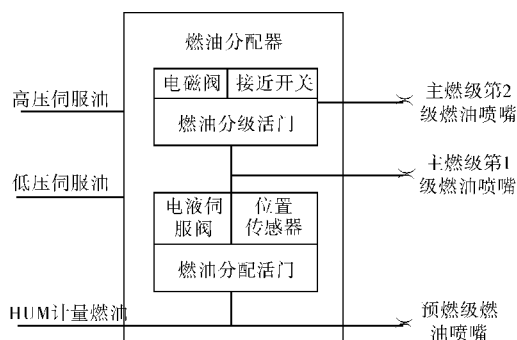


图 4 燃油分配器结构

燃油分配控制包括燃油分级活门的控制和燃油分配活门的控制。燃油分级活门采用开关量控制方式,发动机电子控制器根据控制规律确定燃油分级活门的位置,发出电信号给燃油分级活门电磁阀,控制燃油分级活门打开或关闭,接近开关将活门的位置信号反馈给电子控制器,用于位置监视和故障诊断。

燃油分配活门采用闭环控制,其控制回路的结构如图 5 所示。电子控制器根据控制规律确定燃油分配活门的位置目标值,根据位置目标值与位置反馈信号(来自位置传感器)的偏差,通过控制算法计算电液伺服阀的控制电流。电液伺服阀接收控制电流调节至燃油分配活门控制腔的伺服燃油,控制燃油分配活门的位置,从而分配到主燃级和预燃级的燃油量。

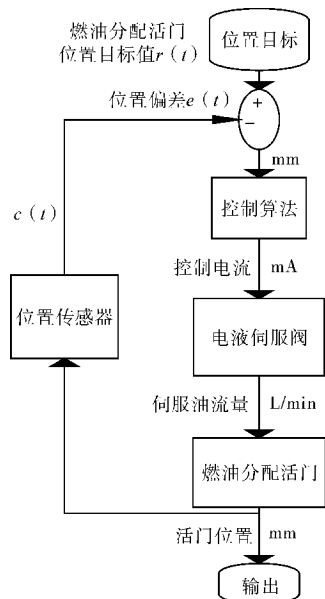


图 5 燃油分配活门控制回路

控制算法采用 PID 算法^[7],是 1 种线性算法,根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成控制偏差 $e(t)=r(t)-c(t)$,将偏差的比例(P)、积分(I)和微分(D)通过线性组合构成控制量,对被控对象进行控制,控制规律为

$$u(t)=k_p[e(t)+\frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt+\frac{T_d}{dt}de(t)] \quad (1)$$

传递函数为

$$G(s)=k_p(1+\frac{1}{T_i s}+T_d s) \quad (2)$$

式中: k_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

2 燃油分配仿真分析

随着计算机仿真技术的发展,工程系统的设计逐渐使用计算机对实际系统进行数字仿真。法国 IMAGE 公司的 AMESim 软件已广泛应用于先进航空发动机燃油系统的设计^[8]。为研究燃油分配系统的性能,利用 AMESim 软件对该系统进行了建模仿真。

2.1 燃油分配系统模型

根据燃油分配系统的结构搭建燃油分配系统模型,如图 6 所示。模型中燃油喷嘴采用当量喷嘴。

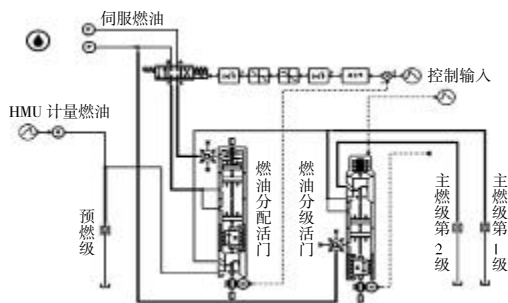


图 6 燃油分配系统模型

2.2 燃油分配仿真结果

为分析燃油分级活门关闭时和打开时预燃级和主燃级流量的分配关系,分别对这 2 种情况进行了仿真。燃油分级活门关闭时,只有预燃级和主燃级第 1 级供油,主燃级第 2 级不供油。总燃油流量为 1250 kg/h 和 770 kg/h 时主燃级流量占总流量的百分比如图 7 所示。从图中可见,随着燃油分配活门开度的增大,主燃级流量与总流量之比呈单调增加的关系,在燃油分配活门开度最大时主燃级流量与总流量之比都达到最大值 75%,并且随着燃油分配活门开度的增大,主燃级流量与总流量之比的曲线逐渐趋于平

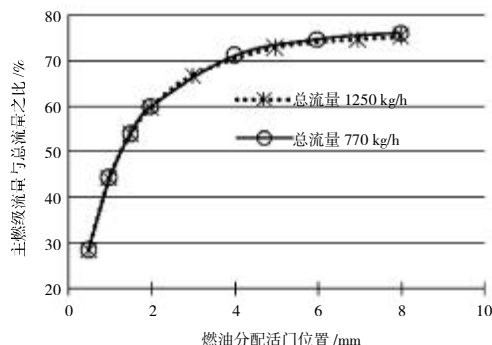


图 7 燃油分配活门关闭时燃油分配情况

缓,到最大点时接近水平。同时,总燃油流量为1250 kg/h和770 kg/h时的曲线重合性较好,误差在1%以内。

燃油分级活门打开时,预燃级、主燃级第1级和主燃级第2级都供油,燃油分配活门打开时燃油分配情况如图8所示。从图中可见,燃油分配活门打开时与燃油分配活门关闭时的预燃级和主燃级流量分配结果相似,惟一不同的是主燃级流量与总流量之比的最大值提高到了82%。

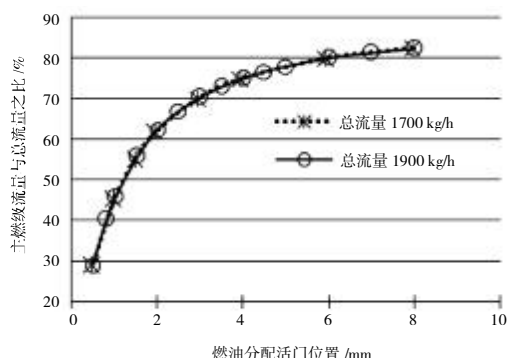


图8 燃油分配活门打开时燃油分配情况

燃油分配活门关闭时和打开时的仿真结果都表明主燃级与预燃级的燃油分配关系与总流量无关,只与燃油分配活门的开度有关,该燃油分配系统能够通过调节燃油分配活门的位置对进入发动机燃烧室预燃级和主燃级的燃油进行分配控制。

2.3 燃油分配结果分析

对相对简单的燃油分配活门关闭时的情况进行分析,燃油分配系统的简化模型如图9所示。图中, λ 为沿程损失系数; ε 为局部损失系数; L 为管道长度; d 为管道直径; v 为流体流速; q_v 为流体体积流量; A 为管道面积; n 表示燃油喷嘴。从图中可见,此时燃油分配系统属于并联管道。并联管道的损失等于各分管道的损失,并联管道的总流量等于各分管道流量的总和^[9]。

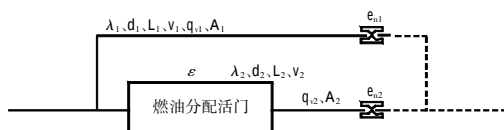


图9 燃油分配活门关闭时燃油分配系统简化模型

由 $h_w = h_f + h_j$ 得出

$$\lambda_1 \frac{L_1 v_1^2}{2dg} + \varepsilon_{n1} \frac{v_1^2}{2g} = \lambda_2 \frac{L_2 v_2^2}{2dg} + \varepsilon \frac{v_2^2}{2g} + \varepsilon_{n2} \frac{v_2^2}{2g} \quad (3)$$

式中: h_w 为总损失; $h_j = \varepsilon v^2/2g$,为局部损失; $h_f = \lambda L v^2/2dg$,为沿程损失。

由于管路相对较短,忽略沿程损失,得出

$$\varepsilon_{n1} v_1^2 = \varepsilon v_2^2 + \varepsilon_{n2} v_2^2 \quad (4)$$

又由 $v = \frac{q_v}{A}$ 得出

$$\frac{q_{v1}}{q_{v2}} = \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{\varepsilon + \varepsilon_{n2}}{\varepsilon_{n1}} \right)^{0.5} \quad (5)$$

从式(5)可见,预燃级与主燃级的燃油分配关系只与预燃级和主燃级的管道面积和局部损失系数有关。在燃油分配系统结构确定的情况下,预燃级管道面积 A_1 、主燃级管道面积 A_2 、预燃级喷嘴局部损失系数 ε_{n1} 和主燃级喷嘴局部损失系数 ε_{n2} 都是定值,惟一可变的是燃油分配活门的局部损失系数 ε ,而 ε 仅与燃油分配活门开度有关。因此,预燃级和主燃级的燃油分配只与燃油分配活门的开度有关,与入口总流量等其他因素无关,这与仿真结果一致。

仿真结果及分析结果都表明,该燃油分配系统能够对进入燃烧室各燃烧区的燃油进行分配控制。

3 燃油分配逻辑

发动机燃油控制如图10所示,电子控制器根据

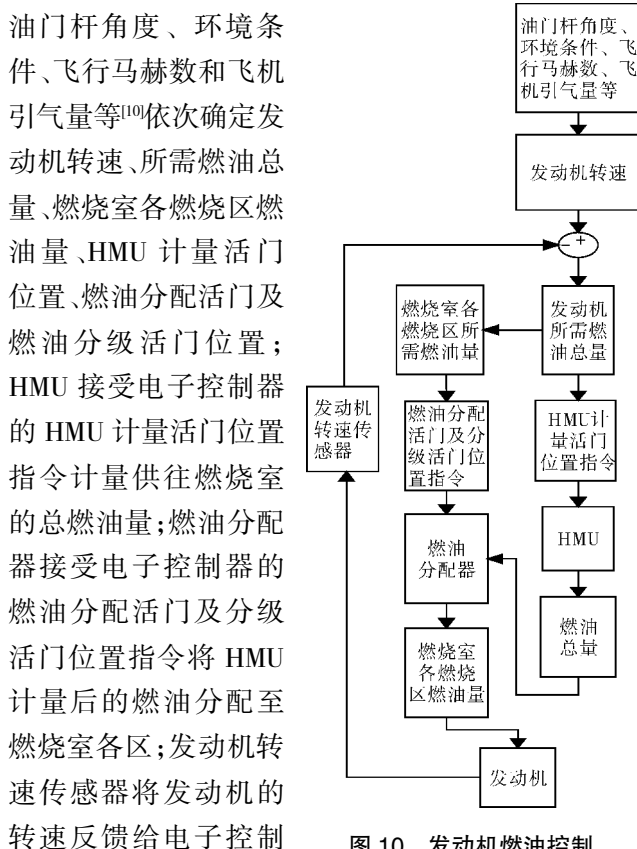


图10 发动机燃油控制

器,形成闭环控制。

根据前文分析可知,在燃油分级活门关闭或打开时预燃级和主燃级燃油的分配关系只与燃油分配活门的开度有关,并且燃油分级活门打开时主燃级的燃油分配量比燃油分级活门关闭时主燃级的燃油分配量更大,分析得到燃油分配控制逻辑(如图 11 所示):

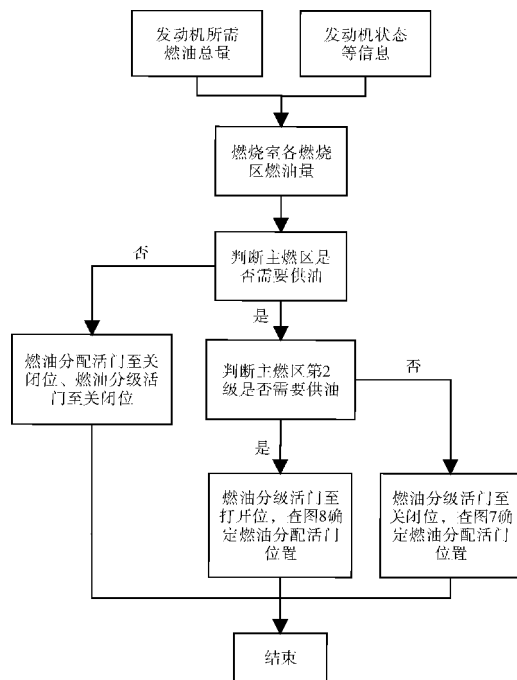


图 11 燃油分配控制逻辑

(1)根据发动机所需燃油总量及发动机状态参数确定燃烧室各燃烧区的燃油量。

(2)判断燃油室主燃区是否需要供油,若否,燃油分配活门至关闭位置,燃油分级活门至关闭位置,转(6)。

(3)判断主燃级第2级是否需要供油,若是,燃油分级活门至打开位置,转(5);若否,燃油分配活门至关闭位置。

(4)计算主燃级流量与总流量之比,查图 7 燃油分级活门关闭时燃油分配曲线,确定燃油分配活门位置,转(6)。

(5)计算主燃级流量与总流量之比,查图 8 中燃油分配活门打开时燃油分配曲线,确定燃油分配活门位置。

(6)结束。

4 结束语

低污染排放是对现代民用航空发动机的基本要

求,低污染燃烧技术是实现低污染排放的惟一途径。本文研究了 1 种应用于低污染燃烧技术的燃油分配方法,从分析结果来看该方法简单、实用,能够满足低污染燃烧技术对燃油分配的要求。

目前,针对低污染燃烧技术的燃油分配技术的研究刚开始,后续将更多的开展这方面的理论和试验研究。

参考文献:

- [1] 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, 23(6): 986-996.
ZHAO Jianxing. Pollutant emission and development of low-emission combustion technology for civil aeroengine [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23 (6): 986-996. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 郭艳龙, 张宝诚, 乔娟. 某型航空发动机燃烧室排气污染数值模拟[J]. 航空发动机, 2008, 34(4): 38-41.
GUO Yanlong, ZHANG Baocheng, Qiao Juan. Numerical simulation of pollutant emissions from an aeroengine combustor [J]. Aeroengine, 2008, 34(4): 38-41. (in Chinese)
- [4] 刘伟, 林宇震, 刘高恩, 等. 低压条件下复合式多级旋流杯燃烧室燃烧效率研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 650-655.
LIU Wei, LIN Yuzhen, LIU Gaoen, et al. Research of combustion efficiency of combustors using hybrid air blast atomizer under low pressure [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5): 650-655. (in Chinese)
- [5] 林宇震, 林阳, 张弛, 等. 先进燃烧室分级燃烧空气流量分配的探讨[J]. 航空动力学报, 2010, 25(9): 1923-1930.
LIN Yuzhen, LIN Yang, ZHANG Chi, et al. Discussion on combustion airflow distribution of advanced staged combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25 (9): 1923-1930. (in Chinese)
- [6] 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 ration on TAPS combustor performance [J]. Aeroengine, 2012, 38(4): 6-10. (in Chinese)
- [7] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 120-135.

(下转第 73 页)