

文章编号: 1000-8055(2010)05-1163-06

某型航空发动机空中起动供油规律的研究

王兆铭^{1,2}, 王福德³, 左伟², 王晨⁴, 巴德纯¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110004;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015;

3. 中国人民解放军 驻沈阳黎明发动机制造公司军事代表室, 沈阳 110043;

4. 大连理工大学 能源与动力学院, 大连 116023)

摘 要: 研究某型航空发动机空中起动困难问题, 现有自动起动器没有考虑飞行高度对供油规律的影响, 发动机在空中起动时存在富油状态. 分析了影响起动供油规律的因素, 在现有自动起动器结构基础上, 设计了高空修正模块来补偿飞行高度对供油规律的影响. 建立了自动起动器的数学模型, 对改进的自动起动器进行了仿真分析和试验. 仿真结果和试验验证了改进方案的可行性, 与地面起动相比, 空中起动的供油量随着飞行高度的增加而降低. 采用改进的空中起动供油规律可补偿飞行高度对供油特性的影响, 解决发动机空中起动时的富油状态问题.

关 键 词: 航空发动机; 燃油调节器; 自动起动器; 空中起动; 供油规律

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Research on fuel supply control law of airstart for an aero-engine

WANG Zhao-ming^{1,2}, WANG Fu-de³, ZUO Wei²,WANG Chen⁴, BA De-chun¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation,

Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China;

3. Customer Representative of Shenyang Liming Engine Manufacturing Corporation,

The Chinese People's Liberation Army, Shenyang 110043, China;

4. School of Energy and Power Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian 116023; China)

Abstract: The problem of airstart of an aero-engine was investigated. The enrichment in airstart of an aero-engine exists because the effects of flying height on fuel-feed characteristics are not considered for the original selfstarter. Various factors affecting the fuel-feed characteristics were investigated. A high altitude compensator was added to the original selfstarter to compensate the effects of flying height on fuel-feed characteristics. The mathematical models of original and improved selfstarters were built respectively. The simulations and tests verify the feasibility of the improved selfstarter, e.g.: airstart fuel supply flow decreases as the altitude increases as compared with the ground starter. The improved selfstarter

收稿日期: 2009-03-10; 修订日期: 2010-03-18

基金项目: 航空科学基金(2007ZB06001)

作者简介: 王兆铭(1962—), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学博士生, 沈阳发动机设计研究所研究员, 主要从事航空发动机控制系统设计与研究.

can compensate the effects of flying height on fuel-feed characteristics and resolve the problem of airstart enrichment.

Key words: aero-engine; fuel control unit; selfstarter; airstart;
fuel supply control law

发动机的起动是将燃气发生器转子从静止状态加速到慢车状态,这是一个复杂的动态过程^[1-2].对发动机起动过程的基本要求是:起动迅速,不熄火,不超温、喘振等.为避免发动机起动过程中出现上述问题,需要对发动机起动的供油规律进行调节.航空发动机的起动包括地面和空中两种状态.空中起动与地面起动有所不同,但均要正确调配燃烧室的供油量和流量变化率,一方面保证涡轮有足够的剩余功率使起动迅速,另一方面则要避免涡轮前的温度过高.由于航空发动机空中起动能力对保证飞机安全飞行至关重要.尤其是单发作战飞机,一旦飞机在空中停车,如果不能可靠地进行空中起动,则可能造成机毁人亡的后果.目前国内外的工程师均采用起动机辅助航空发动机的空中起动,来提高发动机空中起动的性能,确保飞行安全.

起动器建模与仿真是发动机起动性能研究的热点问题之一,文献[3-7]分别采用不同方法对起动机进行建模和仿真研究.而起动供油规律调整方面的研究工作非常少,文献[8]基于神经网络方法研究了如何调整高原起动供油规律.文献[9-10]研究了空中起动供油规律问题,其中文献[9]采用降低地面起动供油流量的方法,满足空中起动的要求.文献[10]采用高空修正膜盒的方法,补偿飞行高度的影响,降低空中起动的油气比,保证飞行安全.

某型航空发动机采用机械液压式控制系统,该型自动起动器的地面起动效果良好,但空中起动则相对困难,尤其在高空起动飞行包线的左上角(高空小马赫数)存在明显的起动富油问题,一方面造成空中起动的包线范围小、另一方面使得从停车至允许再起动的间隔时间长.本文针对该问题,借鉴文献[10]的方法,对起动器的结构进行了改进,增加了一个高空修正部件,补偿飞行高度变化对起动器的影响,满足发动起空中起动的要求.采用AMESim对改进的自动起动器进行仿真分析,对改进后的起动器进行了试验验证.验证结果说明了改进后的自动起动器可以降低空中起动的燃油供油流量.

1 自动起动器原理

某型发动机采用分段控制策略:自始转速以下为流量控制,油门杆位置对应的是希望的燃油流量;自始转速以上为转速控制,油门杆位置对应的是希望的低压转子转速.起动时,油门杆始终位于慢车域,因此在起动阶段,流量控制器(由柱塞泵、油门开关、压差活门等组成)的输出流量保持为恒定的慢车流量.对起动供油规律的调节由自动起动器实现.

图1给出了自动起动器的示意图,自动起动器由喷嘴挡板、薄膜、弹簧和空气节流嘴等元件组成.其基本原理是喷嘴挡板活门按发动机状态将流量控制器的部分输出流量放回低压腔,从而间接控制进入发动机的燃油流量.具体的实现方法是:利用两个节流嘴构成一个分压器,将来自压气机出口的 p_2 压强减压后(p_2')引入薄膜右腔,薄膜的左腔与大气相通.薄膜两侧 p_2' 压强、弹簧力和大气压强的合力作用在喷嘴挡板上,与挡板本身的液压力、弹簧力共同决定挡板活门的开度.在起动过程中,由于初期转速较低, p_2' 压强很小,挡板活门左面的作用力大于右面,挡板活门被打开,将供往发动机的部分燃油放入低压腔.随着发动机转速增大,作用于薄膜的 p_2' 压强比作用于挡板活门的燃油压强上升得快,因此活门逐渐关闭,放油量减少,从而使发动机供油增多.当 p_2' 达到某一压强后,活门已经完全关闭,供入发动机的燃油

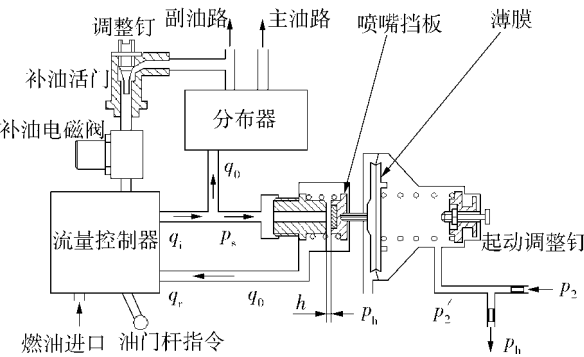


图 1 自动起动器示意图
Fig. 1 Selfstarter schematic

流量等于慢车流量, 发动机不断加速直至慢车. 由于空中起动需要的供油量比地面少, 为了兼顾地面起动和空中起动, 使地面起动迅速、空中起动不富油超温, 某型发动机采用了补油措施. 即自动起动器本身的供油规律为兼顾空中起动而调整得偏低, 在地面起动时按一定的时序接通补油电磁阀, 通过补油活门向发动机额外补充部分燃油. 图 2 为起动供油规律示意图.

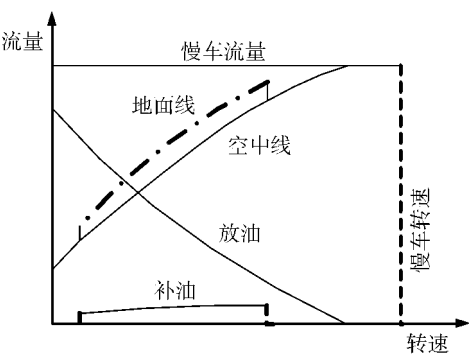


图 2 供油规律示意图
Fig. 2 Fuel flow schematic

发动机地面起动供油规律的调整元件是起动调整钉、分压器节流嘴和补油活门调整钉. 综合使用这三项调整手段, 就可以调整发动机起动的供油规律.

虽然该型自动起动器的地面起动效果很好, 但是在实际空中起动使用中, 空中惯性降转起动则存在一定问题, 主要是从停车至再起之间需要停留较长时间, 需要发动机恢复冷态. 如果在较热状态进行空中起动, 发动机有可能超温. 发动机的起动性能是由发动机自身特性、起动供油规律共同决定的, 因此在理论上, 优化起动性能可从多方面考虑, 但修改起动供油规律无疑是最简便可行的措施. 下面将从自动起动器供油规律的角度分析某型发动机空中起动性能不理想问题, 并提出自动起动器的改进方案.

2 自动起动器分析及方案改进

由上述介绍可知, 某型航空发动机的自动起动器功能较为简单, 仅按照压气机出口压强调节发动机的起动供油量, 用补油措施调整地面起动和空中起动供油规律的差异. 空中起动时由于受高空飞行条件的影响, 发动机需要的起动供油量较地面少且随高度变化. 但是自动起动器不具备主动补偿高空影响的功能, 其空中起动的供油规

律基本上是固定的(在地面规律的基础上去掉补油), 因此难以兼顾飞行包线内所有点的空中起动.

综上所述, 某型发动机空中起动困难的原因是, 自动起动器不能兼顾飞行包线的所有位置: 为了使地面起动顺利, 自动起动器的供油量较多, 而自动起动器不能主动补偿高空影响, 从而导致空中起动时容易处于富油状态.

基于此, 我们在自动起动器原型的基础上, 增加了一个高空修正膜盒(见图 3)以补偿高度变化的影响. 当高度增加环境压强下降时, 该膜盒膨胀, 通过杠杆和弹簧对薄膜——喷嘴挡板组件施加拉力, 则活门开度加大、回油增加、供油减少, 消除了发动机的富油状态. 改进后的供油规律见图 4.

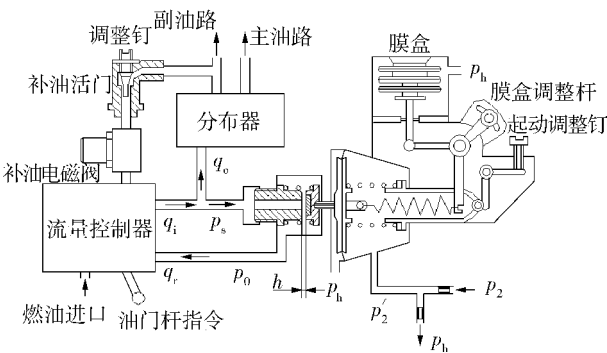


图 3 改进的自动起动器
Fig. 3 Improved selfstarter

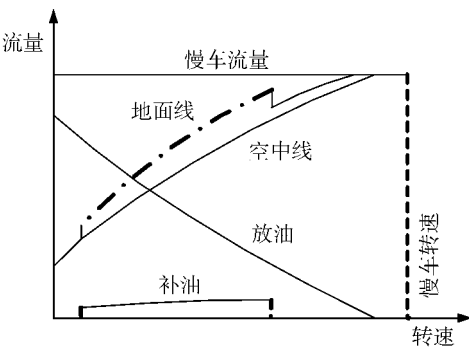


图 4 改进的供油规律
Fig. 4 Improved fuel flow

与原型相比, 改型结构的基本工作参数(弹簧刚度、预紧力, 薄膜有效面积等)不变, 额外增加了一个膜盒和相应的杠杆、膜盒调整杆等辅助元件. 使用膜盒调整杆, 可以设定膜盒投入工作的起始高度. 在起始高度以下(例如地面)膜盒对起动器的供油量无影响, 起动器的特性与原型完全一致. 在起始高度以上, 膜盒开始发挥作用, 使空中的起

动供油量较原型少.适当选择膜盒的参数,改进后的自动起动器就能够克服高空影响,获得合适的地面和空中起动供油规律.

3 自动起动器建模

为了分析自动起动器的性能,建立了原型和改型起动器的数学模型.

3.1 原型结构的建模

以 h 表示喷嘴挡板活门的开度,定义 $h=0$ 的位置为系统的初始位置.

作用在挡板上的液动力 F_1 和静压力 F_2 为

$$F_1 = \frac{4\rho Q_r^2}{\pi d^2} \tag{1}$$

$$F_2 = \frac{\pi d^2}{4} p_s \tag{2}$$

其中 Q_r 为经过喷嘴挡板的放油流量, d 为喷嘴直径, p_s 为分布器进口压强.

作用在挡板左侧的弹簧力 F_3 为

$$F_3 = F_{3.0} - k_3 h \tag{3}$$

其中 $F_{3.0}$ 为该弹簧的预紧力, k_3 为该弹簧的刚度.

作用在薄膜上的气压力 F_4 为

$$F_4 = (p_2' - p_h) \cdot A_e \tag{4}$$

其中 p_h 为大气压, A_e 为薄膜的有效面积.

作用在薄膜右侧的弹簧力 F_5 为

$$F_5 = F_{5.0} + k_5 h \tag{5}$$

其中 $F_{5.0}$ 为该弹簧的预紧力, k_5 为该弹簧的刚度.

将挡板和薄膜视为一个整体,其平衡方程为

$$F_1 + F_2 + F_3 - F_4 - F_5 = Ma \tag{6}$$

对发动机的起动过程而言,挡板和薄膜的动态过程可以忽略,故上式简化为

$$F_1 + F_2 + F_3 = F_4 + F_5 \tag{7}$$

经过喷嘴的放油流量 Q_r 为

$$Q_r = \frac{\pi R_m h^3 (p_s - p_0)}{6\mu l} \tag{8}$$

其中 R_m, l 为喷嘴挡板活门的结构参数, μ 为流量系数, p_0 为低压腔压强.

分布器的进口压强 p_s 可近似认为是供油流量 Q_o 的函数,并从试验数据中得到两者的对应关系

$$p_s = f_1(Q_o) \tag{9}$$

供油流量 Q_o 有如下关系:

$$Q_o = Q_i - Q_r \tag{10}$$

其中 Q_i 为恒定的慢车流量,由发动机主泵调节器中的流量控制器保证.

联合求解方程(7)~(10),即可得到不补油条

件下自动起动器的供油规律.若考虑补油情况,只需在求得的 Q_o 上叠加一个补油流量即可.

3.2 改型结构的建模

薄膜上增加的拉伸弹簧的作用力 F_6 为

$$F_6 = \begin{cases} 0, & x < x_0 + h \\ k_6(x - x_0 - h), & x > x_0 + h \end{cases} \tag{11}$$

其中 k_6 为该弹簧的刚度, x_0 为拉伸弹簧的空行程.

根据膜盒的特性数据,有如下关系:

$$kF_6 = f_2\left(p_h, \frac{1}{k}x\right) \tag{12}$$

其中 k 为杠杆比.由方程(11)和(12)可确定 F_6 与 p_h 的对应关系.

在改型结构中,挡板和薄膜的平衡方程为

$$F_1 + F_2 + F_3 = F_4 + F_5 - F_6 \tag{13}$$

联合求解方程(8)~方程(10)和方程(13),即可得到不补油条件下改型自动起动器的供油规律.

4 仿真分析

在理论分析的基础上,利用 AMESim 仿真软件辅助建立了自动起动器的仿真模型^[11-12],计算了改型起动器的供油规律.自动起动器的 AMESim 仿真模型如图 5 所示,自动起动器的特性曲线如图 6~图 9 所示.其中,图 6、图 7 分别为计算得到的地面起动时副油路压强和供油流量曲线.

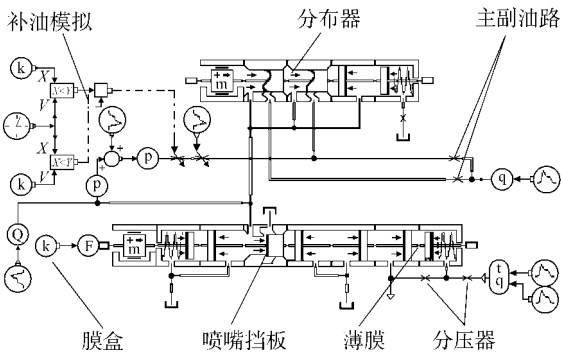


图 5 自动起动器模型

Fig. 5 Model of selfstarter

计算中模拟不同的飞行状态(即不同的 p_h 值),去掉补油后的副油路压强和供油流量曲线见图 8、图 9.图中的三条曲线由上至下分别对应飞行高度由低至高.计算结果表明,高空修正膜盒能够发挥作用,降低空中起动供油流量,可以消除空中起动时的富油现象,且飞行高度越高的时候,修

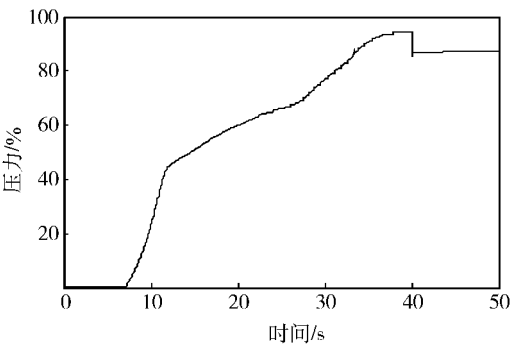


图 6 副油路压强-时间曲线
Fig. 6 Pressure plot

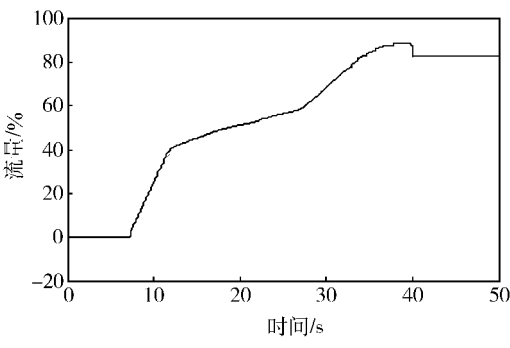


图 7 供油流量-时间曲线
Fig. 7 Fuel flow plot

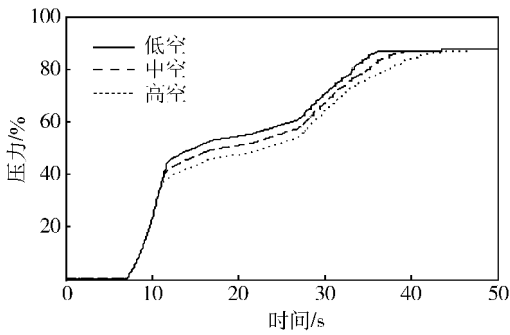


图 8 副油路压强-时间曲线
Fig. 8 Pressure plot

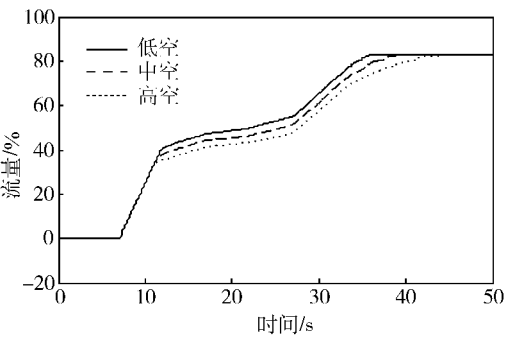


图 9 供油流量-时间曲线
Fig. 9 Fuel flow plot

膜盒腔抽负压的方式模拟高空状态. 试验项目参考了自动起动器的出厂检验试验, 在某一主泵转速下改变起动调整钉的旋入圈数, 录取不同圈数时的供油流量. 部分试验结果见图 10, 包括海平面、低空、中空和高空的起动性能, 可以看出随着飞行高度的增加供油流量减少, 且飞行高度越高, 空中起动供油规律修正的效果越显著.

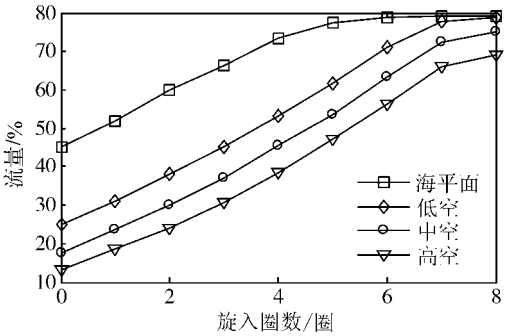


图 10 试验曲线
Fig. 10 Test data plot

由试验结果可知, 膜盒未投入工作时(即地面状态), 改型的自动起动器能够实现与原型基本一致的供油规律. 而对膜盒腔抽低压模拟高空条件后, 改型自动起动器的供油流量明显减少, 证明膜盒发挥了降低流量的修正作用.

通过试验不仅证明了本文提出的改进方案的有效性, 也获得了必要的技术数据, 为改进方案的进一步完善奠定了基础.

5 结 论

本文研究了某型航空发动机空中起动自动起动器的供油规律, 在现有起动器的基础上增加了一个高空修正膜盒, 补偿飞行高度对自动起动器供油规律的影响. 对改进的自动起动器进行了仿

正膜盒对起动器流量的修正作用越显著. 图 6 ~ 图 9 中仿真计算得到的结果与真实值基本一致.

需要指出的是, 由于实际系统结构和工作条件的复杂性, 精确模拟自动起动器的工作过程比较困难. 因此精确的、有工程意义的结果仍需通过试验获得.

4 试验验证

为了验证改进方案的可行性, 对设计的试验件进行了自动起动器原型和改型的对比试验, 以

真分析和试验验证. 得到如下结论: 采用改进的自动起动机不影响地面的起动供油规律; 通过采用增加高空修正膜盒的结构、调整高空起动供油量的手段, 在某高度范围内可以有效调节发动机空中起动时供油规律, 解决某型发动机空中起动存在的富油状态问题.

参考文献:

- [1] 朴英. 航空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 Wenxing, 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] 吴利荣, 李剑, 谢寿生, 等. 某型发动机高原起动过程数学模型建立[J]. 航空动力学报, 2004, 19(1): 58-60.
WU Lirong, LI Jian, XIE Shousheng, et al. Establishment of a certain aero-engine starting mathematical model in plateau regions[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(1): 56-60. (in Chinese)
- [4] 周文祥, 黄金泉, 窦建平. 涡扇发动机部件级起动模型[J]. 航空动力学报, 2006, 21(2): 248-253.
ZHOU Wenxing, HUANG Jinquan, DOU Jianping. Development of component-level startup model for a turbofan engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(2): 248-253. (in Chinese)
- [5] 黄向华, 郑绪生. 基于逐级叠加法的航空发动机起动模型研究[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 540-544.
HUANG Xianghua, ZHENG Xusheng. Research on startup model of aircraft engine based on stage-stacking method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 540-544. (in Chinese)
- [6] 苏伟生, 孙建国, 程蓝, 等. 基于扭矩特性的航空发动机起动系统数学模型[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 499-502.
SU Weisheng, SUN Jianguo, CHENG Lan, et al. Study on mathematic model of aeroengine starting systems based on moment characteristics[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3): 499-502. (in Chinese)
- [7] 程涛, 祈英, 孟庆明. 涡扇发动机主燃油控制系统建模与仿真研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(3): 317-319.
CHENG Tao, QI Ying, MENG Qingming. Modeling and simulation of main fuel control of turbofan engine[J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(3): 317-319. (in Chinese)
- [8] 乔洪信, 夏爱国, 杨立. 某型航空发动机高原使用起动供油量调整研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(4): 534-537.
QIAO Hongxin, XIA Aiguo, YANG Li. Study of adjusting aeroengine starting fuel supply in the plateau area[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4): 534-537. (in Chinese)
- [9] 张绍基, 郅连喜. 1 项扩大涡扇发动机空中起动包线的有效措施[J]. 航空发动机, 2009, 35(2): 1-5.
ZHANG Shaoji, BING Lianxi. An effective measure of enlargement airstart envelope for turbofan engine[J]. Aeroengine, 2009, 35(2): 1-5. (in Chinese)
- [10] 樊丁, 张亦程, 臧学锋. 某型航空发动机起动调节器建模及起动特性研究[J]. 航空发动机, 2005, 31(1): 31-34.
FAN Ding, ZHANG Yicheng, QI Xuefeng. Modeling of an aeroengine jump-start regulator and study of the startup characteristics[J]. Aeroengine, 2005, 31(1): 31-34. (in Chinese)
- [11] 任新宇, 郭迎清, 姚华廷. 基于 AMESim 的航空发动机防喘调节器性能仿真研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(4): 572-576.
REN Xinyu, GUO Yingqing, YAO Huating. A simulation of the anti-surge regulator performance for the aeroengine using AMESim[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(4): 572-576. (in Chinese)
- [12] 杨锡武, 何保成, 任凤升, 等. 某型弹用冲压发动机巡航段供油振荡的数值仿真[J]. 推进技术, 2006, 27(2): 158-161.
YANG Xiwu, HE Baocheng, REN Fengsheng, et al. Numerical simulation for ramjet cruising stage fuel-supplied oscillations[J]. Journal of Propulsion of Propulsion Technology, 2006, 27(2): 158-161. (in Chinese)