

基于 PWM 控制的燃油调节器 执行元件匹配特性研究

周振华, 罗畅敏, 周 龙, 蒋安常, 杜丛霖
(中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司, 贵阳 550009)

摘 要: 以基于高频脉宽调制(PWM)控制的发动机燃油调节器计量控制装置为研究对象,通过数学模型理论推导出关键执行元件高速电磁阀、脉冲阻尼活门、缓冲器的主要参数静态匹配方程,并与 AMESim 仿真结果进行对比,验证了方程的准确性。同时,通过 AMESim 仿真和工程试验得到计量控制装置平衡占空比为 50%时的动态匹配特性。为工程实践中航空发动机燃油调节器计量控制模块的设计及故障分析提供了理论依据,具有一定的工程应用参考价值。

关键词: 航空发动机;燃油调节器;控制系统;高频脉宽调制(PWM);匹配特性;仿真模型

中图分类号: V235.11*3 文献标识码: A 文章编号: 1672-2620 (2019) 04-0043-05

Research on matching characteristics of fuel regulator actuators based on PWM control

ZHOU Zhen-hua, LUO Chang-min, ZHOU Long, JIANG An-chang, DU Cong-lin

(AECC Guizhou Honglin Aero Engine Control Technology Corporation Ltd., Guiyang 550009, China)

Abstract: The engine fuel regulator measurement control device based on the PWM control was studied. The static matching equation for the main parameters of key actuator high-speed solenoid valve, pulse damping valve and buffer was deduced using mathematical model. Then the results were compared with the AMESim simulation results and the accuracy of the equations was validated. Meanwhile, the dynamic matching characteristics of measurement control device 50% balance duty ratio was obtained by AMESim simulation and engineering tests. This method provides theory basis for design and failure analysis of aero-engine fuel regulator measurement control device and owns reference value of engineering application.

Key words: aero-engine; fuel regulators; control system; pulse width modulation(PWM); matching characteristics; simulation model

符号表

| | |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| A 高速电磁阀过流面积/ mm^2 | p 进口燃油压力/ MPa |
| A_1 缓冲器等效节流面积/ mm^2 | p_0 回油压力/ MPa |
| A_2 脉冲阻尼活门节流面积/ mm^2 | p_1 计前压力/ MPa |
| A_3 高速电磁阀等效节流面积/ mm^2 | p_2 控制腔压力/ MPa |
| A_4 计量活门控制腔作用面积/ mm^2 | p_3 高速电磁阀进口压力/ MPa |
| A_5 计量活门回油作用面积/ mm^2 | Q 高速电磁阀额定流量/(L/h) |
| C_d 流量系数/ MPa | \bar{Q} 高速电磁阀平均流量/(L/h) |
| f 摩擦力/ N | Q_1 缓冲器流量/(L/h) |
| g 重力加速度/(m/s^2) | Q_2 脉冲阻尼活门流量/(L/h) |
| | Q_3 高速电磁阀工作流量/(L/h) |

Q_4 包胶活门流量/(L/h)

s 阀全开时间或阀全关时间与工作时间之比

γ 工作介质(燃油)重度/(N/m³)

1 引言

发动机燃油调节器是实现发动机燃油计量与分配的主要部件,其控制品质的好坏将直接影响发动机的性能。某无人机用发动机控制系统采用基于PWM的控制方式对燃油调节器计量模块进行控制。燃油调节器计量模块主要由计量活门、缓冲器、脉冲阻尼活门、高速电磁阀、位移传感器等组成。工作过程中,电子控制器根据位移给定和位移反馈的差值经PI调节后输出占空比信号,控制高速电磁阀的回油流量,实现对计量活门的控制。系统平衡状态时占空比值在某一固定值处,该值被称为平衡占空比,通常为(50±5)%。在控制器PI固定的情况下,缓冲器、脉冲阻尼活门、高速电磁阀之间需要具有一定的匹配关系,才能保证控制系统的控制品质。

目前,我国发动机燃油调节器多属测绘产品,缺乏对控制方式的正向设计研究,可参考的文献也较少,设计阶段只能借鉴已有产品的技术参数,通过优化结构尺寸的方式实现技术要求。本文以基于PWM控制的燃油调节器典型结构为研究对象,建立了理论数学模型,推导出了关键执行元件高速电磁阀、脉冲阻尼活门、缓冲器的主要参数静态匹配方程,同时利用作为航空发动机燃油控制系统设计辅助工具^[1-3]的AMESim仿真平台进行建模和仿真分析,进一步验证了方程的正确性。

2 静态匹配特性

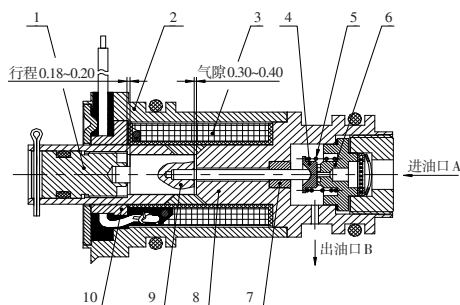
2.1 高速电磁阀结构特性

常开式高速电磁阀的基本结构如图1所示,由调整头、线圈极靴组件、O形密封圈、衔铁组件、喷嘴组件、挡板弹簧、调整螺钉、鞍形垫片、滤网组件、垫片、紧固螺钉、壳体组件等组成。工作过程中,高速电磁阀的平均流量与占空比脉冲信号 s 成正比,即:

$$\bar{Q} = Qs = C_d A \sqrt{\frac{2g\Delta p}{\gamma}} s \quad (1)$$

式中: C_d 与活门的型孔形状、位移、型孔前后压差、液体粘度等因素有关^[4],一般取0.60~0.85。

由式(1)可看出,通过调节占空比可以控制通过阀的平均流量,从而实现对流量和压力的控制。其



1-调整头;2-壳体;3-线圈组件;4-挡板弹簧;5-挡板;6-喷嘴;
7-导向套;8-极靴组件;9-衔铁组件;10-线圈压块

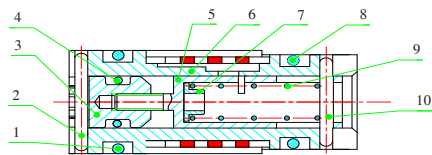
图1 高速电磁阀结构

Fig.1 Structure diagram of the high-speed solenoid valve

控制精度主要取决于流体特性、占空比及工作频率等因素。工程上高速电磁阀工作频率一般为40 Hz。

2.2 脉冲阻尼活门结构特性

脉冲阻尼活门的作用,一是减小高速电磁阀流量脉动对控制腔压力的影响;二是使计量活门稳态时的平衡占空比可调,便于高速电磁阀与缓冲器的工程匹配。图2给出了脉冲阻尼活门的结构。通过调整块的拧入圈数可调整脉冲阻尼活门的过流面积,调整块螺纹螺距为0.25 mm,最小调节圈数为1/8圈。这种结构的优点是脉冲阻尼活门始终固定,不受燃油压力脉动的影响;缺点是占空比调整不连续,为适应占空比的调整要求,需要准确建立脉冲活门型孔与高速电磁阀、缓冲器的匹配关系。



1-密封圈,2-销子,3-调整块,4-密封圈,5-调整活门,
6-衬套,7-弹簧座,8-密封圈,9-弹簧,10-销子

图2 脉冲阻尼活门结构

Fig.2 Structure diagram of the pulse damping valve

2.3 缓冲器结构特性

缓冲器的作用是为油路引入流体状态稳定的燃油。其结构如图3所示,主要由5个不同直径和引流角度的节流孔组成。理论分析时,可将其等效为一个固定截面积的节流嘴。

2.4 控制油路流量连续性方程

燃油调节器工作过程中,当控制器对高速电磁阀输出的占空比信号改变时,经缓冲器进入控制腔的燃油通过脉冲阻尼活门和高速电磁阀的放油量就会产生变化,从而改变控制腔的燃油压力,实现计量

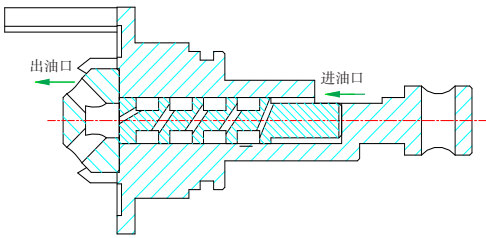


图3 缓冲器结构
Fig.3 Buffer structure

活门的移动。因此,计量活门控制腔压力不仅与进口压力、回油压力、摩擦力等载荷有关,还与缓冲器、脉冲阻尼活门、高速电磁阀的有效过流面积有关,为此建立的控制油路等效模型如图4所示。

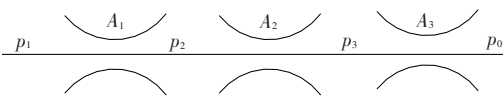


图4 控制油路等效模型
Fig.4 Equivalent model of control fuel circuit

由流量连续性方程,可建立缓冲器流量、脉冲阻尼活门流量、高速电磁阀工作流量的关系式:

$$Q_1 = C_d A_1 \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_2)}{\gamma}} \tag{2}$$

$$Q_2 = C_d A_2 \sqrt{\frac{2g(p_2 - p_3)}{\gamma}} \tag{3}$$

$$Q_3 = C_d A_3 \sqrt{\frac{2g(p_3 - p_0)}{\gamma}} \tag{4}$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 \tag{5}$$

联立式(2)~式(5)求解可得:

$$p_2 = \frac{(1 + \lambda_2^2)\lambda_1^2 p_1 + p_0}{(1 + \lambda_2^2)(1 + \lambda_1^2) - \lambda_2^2} \tag{6}$$

式中: $\lambda_1 = A_1/A_2$, $\lambda_2 = A_2/A_3$ 。

2.5 计量活门受力分析

对计量活门进行受力分析,可建立力平衡方程:

$$\begin{aligned} p_2 A_4 &= p_1 (A_4 - A_5) + f + p_0 A_5 \Rightarrow \\ p_2 &= p_1 \frac{(A_4 - A_5)}{A_4} + \frac{f}{A_4} + p_0 \frac{A_5}{A_4} \end{aligned} \tag{7}$$

一般使 $A_5 \approx 0.5 A_4$, 且因 f/A_4 数值很小,故:

$$p_2 = 0.5 p_1 + 0.5 p_0 \tag{8}$$

2.6 静态匹配方程

联立式(6)、式(8)可得:

$$\lambda_1^2 + \lambda_2^2 \lambda_1^2 = 1 \tag{9}$$

即:

$$\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 + \left(\frac{A_1}{A_3}\right)^2 = 1 \Rightarrow A_2 = \frac{A_1 A_3}{\sqrt{A_3^2 - A_1^2}} \tag{10}$$

根据式(10),可建立高速电磁阀、脉冲阻尼活

门、缓冲器等效过流面积的内在联系,为脉冲阻尼活门型孔的正向设计提供依据。

2.7 匹配性设计

根据计量活门开环移动时间(0.55~1.20 s)要求,确定缓冲器流量在1 MPa压差下为270~330 ml/min。为保证出口不节流,高速电磁阀工作流量应大于缓冲器流量。为此,确定高速电磁阀在1 MPa压差下平衡占空比为50%时的工作流量为(380±30) ml/min。根据缓冲器和高速电磁阀的流量特性,计算出其等效流通面积,并利用式(10)计算出脉冲阻尼活门过流面积,进而确定脉冲阻尼活门的过流型孔。由表1中过流面积可知,脉冲阻尼活门型孔面积的可调范围应为0.16~1.10 mm²。在考虑设计裕度和工程实现的情况下,设计出的调节器脉冲阻尼活门的可调面积范围为0.15~1.80 mm²,略大于计算值。图5给出了脉冲阻尼活门行程与过流面积的关系。

表1 脉冲阻尼活门过流面积计算

Table 1 Flow area calculation of the pulse damping valve

| s | Q/(ml/min) | A ₃ /mm ² | A _{1min} /mm ² | A _{1max} /mm ² | A _{2min} /mm ² | A _{2max} /mm ² |
|-----|------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 45% | 700 | 0.15 | 0.13 | 0.16 | 0.25 | — |
| 50% | 700 | 0.16 | 0.13 | 0.16 | 0.20 | 0.46 |
| 55% | 700 | 0.18 | 0.13 | 0.16 | 0.18 | 0.30 |
| 45% | 740 | 0.16 | 0.13 | 0.16 | 0.22 | 1.10 |
| 50% | 740 | 0.17 | 0.13 | 0.16 | 0.19 | 0.34 |
| 55% | 740 | 0.19 | 0.13 | 0.16 | 0.17 | 0.26 |
| 45% | 780 | 0.17 | 0.13 | 0.16 | 0.20 | 0.45 |
| 50% | 780 | 0.18 | 0.13 | 0.16 | 0.18 | 0.29 |
| 55% | 780 | 0.20 | 0.13 | 0.16 | 0.16 | 0.24 |
| 45% | 820 | 0.17 | 0.13 | 0.16 | 0.19 | 0.34 |
| 50% | 820 | 0.19 | 0.13 | 0.16 | 0.17 | 0.26 |
| 55% | 820 | 0.21 | 0.13 | 0.16 | 0.16 | 0.23 |

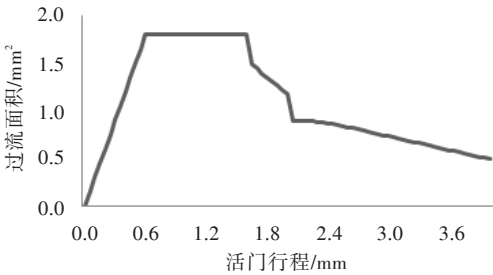


图5 脉冲阻尼活门行程与过流面积的关系

Fig.5 Relationship between the pulse damping valve distance and flow area

3 动态特性研究

3.1 仿真模型

以某型燃油调节器为例,运用AMESim软件建

立其仿真模型^[5-9],见图6。模型采用AMESim液压元件库中元件按照实际结构搭建,并依据元件设计几何尺寸确定模型结构参数。这样不仅充分发挥了AMESim在液压系统建模和流体计算方面的优势,还可解决仿真过程中系统软参数的确定等问题^[10]。设定工作介质为3号喷气燃料(重度7 693 N/m³),进口燃油压力0.2 MPa,转速14 500 r/min。

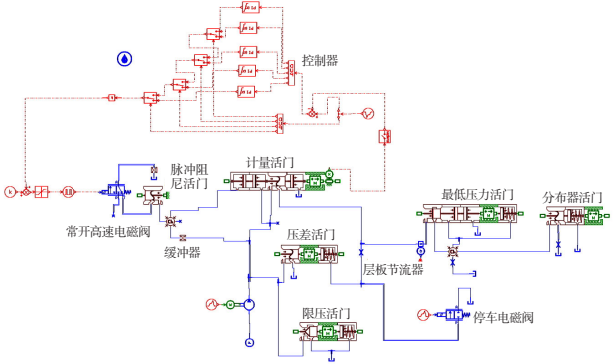


图6 AMESim仿真模型
Fig.6 AMESim simulation model

3.2 计算结果与仿真结果对比分析

选取高速电磁阀和缓冲器的典型匹配方案进行仿真。在占空比为50%的条件下,将脉冲阻尼活门过流面积理论计算结果与仿真结果进行对比,结果见表2。可见,二者的偏差不大于8%。造成偏差的原因是理论公式推导过程中忽略了摩擦力、液压阻尼等因素影响,而仿真时考虑了这些因素影响。

表2 脉冲阻尼活门过流面积计算结果与仿真结果
Table 2 Flow area calculation and simulation results of the pulse damping valve

| 方案 | Q_3 /(ml/min) | Q_1 /(ml/min) | A_2 | | |
|----|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|------|
| | | | 计算/mm ² | 仿真/mm ² | 偏差/% |
| 1 | 700 | 270 | 0.200 | 0.216 | 8 |
| 2 | 700 | 330 | 0.460 | 0.465 | 1 |
| 3 | 760 | 270 | 0.180 | 0.195 | 8 |
| 4 | 760 | 330 | 0.310 | 0.330 | 6 |
| 5 | 820 | 270 | 0.170 | 0.182 | 7 |
| 6 | 820 | 330 | 0.260 | 0.270 | 4 |

3.3 动态匹配特性分析

该型燃油调节器计量活门动态指标为:调节时间小于2 s;超调量不大于20%;稳态误差为±0.25%;平衡占空比波动量小于±5%。给定计量活门位置阶跃信号,在平衡占空比为50%条件下,按表2进一步对上述匹配关系进行动态特性仿真。从图7中计量位置全程反馈曲线仿真结果可知,方案1~方案6

计量活门的动态指标均满足设计要求。

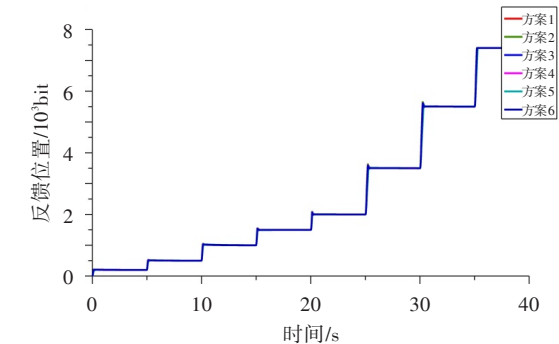


图7 计量位置全程反馈曲线
Fig.7 Meter position full stroke feedback curve

图8给出了不同方案得到的计量活门小阶跃位置特性曲线。由图可知,高速电磁阀流量相同(方案1和方案2,方案3和方案4,方案5和方案6),且调整平衡占空比为50%时,缓冲器流量越大,计量活门响应越快,稳定裕度相应降低。缓冲器流量相同(方案1、3和5,方案2、4和6),且调整平衡占空比为50%时,高速电磁阀流量越大,计量活门响应越慢,稳定裕度相应提高。

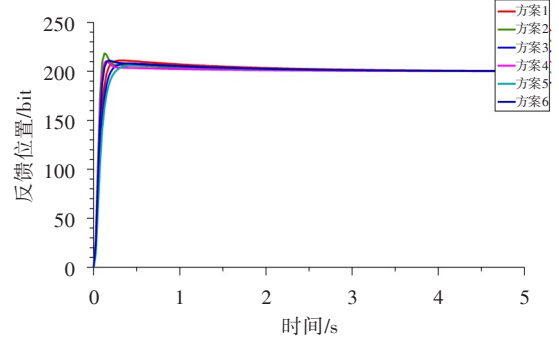


图8 不同方案计量活门小阶跃位置特性曲线
Fig.8 Characteristic curve of small step positions for different metering valves

3.4 试验验证

按表2进行试验验证,得到了各方案的占空比曲线、计量活门给定位置曲线、计量活门反馈位置曲线,见图9。由图可知,试验结果与仿真结果基本一致,验证了仿真结果的正确性。

4 结论

建立了基于PWM控制方式的燃油调节器各个执行元件的静态匹配数学模型,得到了关键参数的静态匹配关系,并通过仿真和试验获得了各控制元件的动态匹配特性,可为同类控制方式产品的正向设

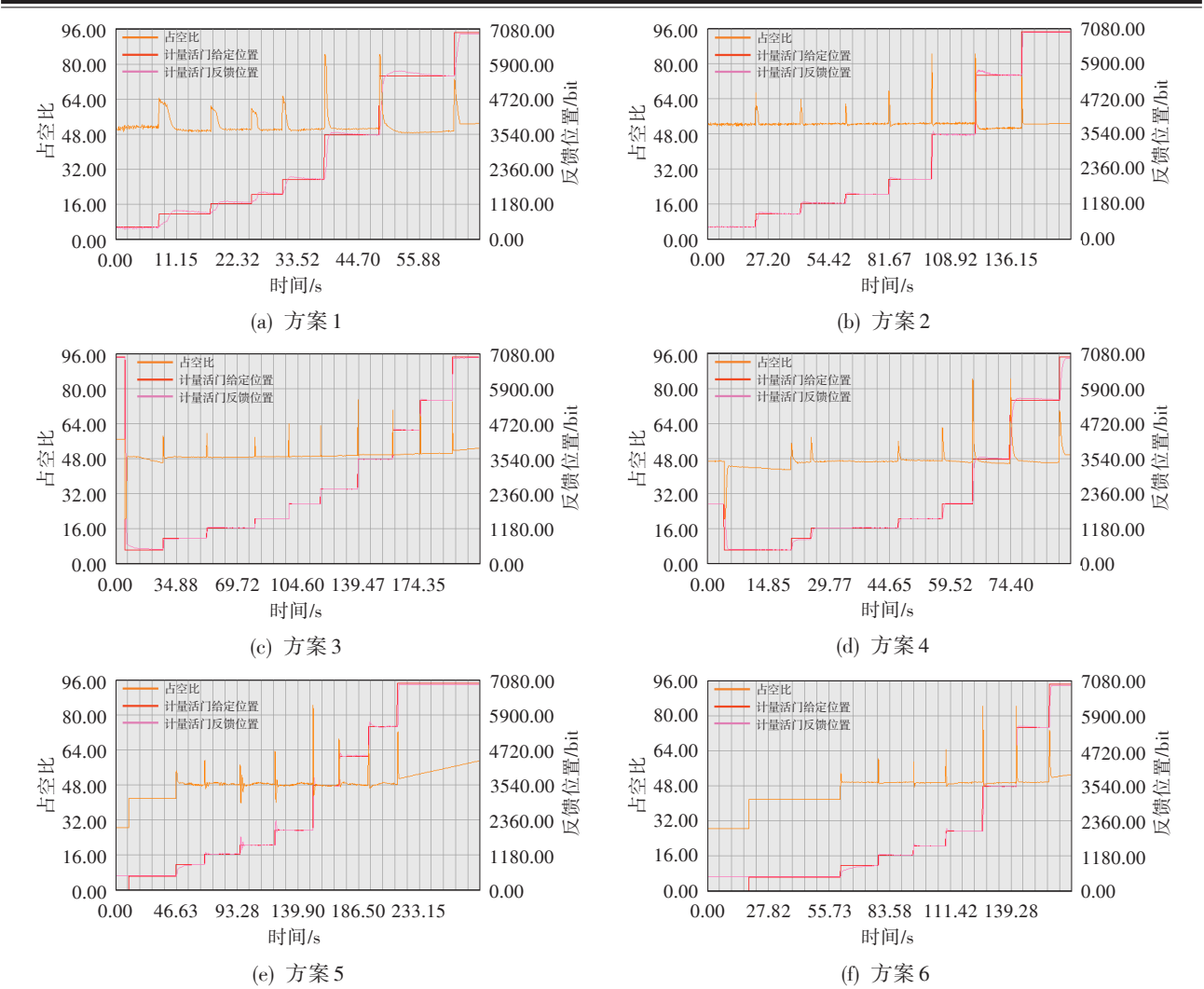


图9 各方案占空比曲线、计量活门给定位置曲线、计量活门反馈位置曲线

Fig.9 Duty ratio curve, metering valve specified position curve and metering valve feedback position curve for each program

计研发和工程排故提供借鉴与参考。主要结论为：

(1) 获得了基于PWM控制的燃油调节器执行元件匹配方程,即缓冲器等效过流面积与脉冲阻尼活门等效过流面积的比值的平方加上缓冲器等效过流面积与高速电磁阀等效过流面积的比值的平方等于1,该方程可用于缓冲器、高速电磁阀、脉冲阻尼活门的匹配性设计。

(2) 高速电磁阀、脉冲阻尼活门、缓冲器进行匹配时,在使用范围内,高速电磁阀流量越大,计量活门响应越慢,稳定裕度提升;缓冲器流量越大,计量活门响应越快,稳定裕度降低。

参考文献：

[1] 李成功. 液压系统建模与仿真分析[M]. 北京:航空工业出版社,2008.
[2] 梁全. 液压系统 AMESim 计算机仿真指南[M]. 北京:

机械工业出版社,2014.
[3] 王彬,赵皓岑,叶志峰. 加力燃油计量装置的 AMESim 仿真研究[J]. 航空发动机,2014,40(5):62—66.
[4] 葛树宏,樊丁,彭凯. 某型航空发动机燃油调节器改型设计研究[J]. 计算机仿真,2012,29(8):81—84.
[5] 刘海丽. 液压机械系统建模与仿真软件 AMESim 及其应用[J]. 机床与液压,2006,(6):124—126.
[6] 李阔,郭迎清. AMESim 仿真技术在航空动力控制系统中的应用[J]. 计算机仿真,2009,26(1):107—110.
[7] 马静,王镛根. 某导弹燃油调节器的建模及仿真研究[J]. 计算机仿真,2003,20(9):35—38.
[8] 付永领,祁晓野. AMESim 系统建模和仿真——从入门到精通[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
[9] 魏艳艳,王宏宇,缪万波. 某型涡轴发动机等压差活门建模分析[J]. 航空发动机,2014,40(4):75—78.
[10] 陈宏亮. X-8 航空发动机燃油调节系统建模仿真研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.