

# AMESim 仿真技术在高速电磁阀中的应用

王秋霞, 樊 丁, 彭 凯

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

**摘 要:** 以某型航空发动机电子控制系统中的高速电磁阀为研究对象, 针对建模仿真问题进行了研究。分析了高速电磁阀工作原理, 运用 AMESim 建模仿真平台, 建立了高速电磁阀较为精确的数学模型, 并对所建模型的占空比-流量特性进行仿真分析, 与该型电磁阀试验数据进行比较, 分析所建数学模型的精度及准确性。仿真结果表明: 所建高速电磁阀数学模型的占空比-流量特性误差保持在 8% 以内, 能够满足产品所规定的精度要求。

**关 键 词:** 航空发动机; 高速电磁阀; 占空比; AMESim; 建模仿真

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

## High speed solenoid valve with the application of AMESim

WANG Qiu-xia, FAN Ding, PENG Kai

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The issue of modeling and simulation of a kind of high speed solenoid valve used for an electronic control system of a certain engine was discussed. According to the analysis of the operating principle of the high speed solenoid valve, the mathematical model of high accuracy for the high speed solenoid valve was built by use of the simulation software AMESim. The analysis on the duty ratio-volume flow characteristic was completed according to the simulation result of the model. By comparison of the experimental data of the electrical valve, the accuracy and precision of the mathematical model were analyzed. Simulation results show that the error of the duty ratio-volume flow characteristic of mathematical model for high speed solenoid valve is no more than 8%, thus satisfying the accuracy requirements set by the products.

**Key words:** aero-engine; high speed solenoid valve; duty ratio; AMESim; modeling and simulation

高速电磁阀是一种电-液转换装置<sup>[1]</sup>, 作为电子控制器的关键执行元件, 被应用于航空发动机电子控制系统中。自 20 世纪 70 年代问世以来, 国内外许多厂家、公司竞相研制出不少型式结构的高速电磁阀。在液压学科领域内, 高速电磁阀的研究和应用愈加得到重视。近 10 年来, 国外已对高速电磁阀开展研究, 并取得了一定的成果<sup>[2-3]</sup>。自 20 世纪 80 年代以来, 我国对高速电磁阀的研究工作主要有两个方面的内容: 一方面是跟踪国外

的研究, 探索高速电磁阀实现快速响应的基本理论; 另一方面则是自主或合作开发高速电磁阀样机及与之配套的驱动控制装置。

本文针对某型航空发动机用高速电磁阀的模型, 利用 AMESim 的系统建模及仿真分析等功能, 建立了该型高速电磁阀的 AMESim 数学模型<sup>[4-6]</sup>。在此基础上对模型和实物的占空比-流量(文中的流量均为体积流量)特性及动态响应特性进行分析比较<sup>[7-10]</sup>。结果表明: 所建立的高速电磁阀数学模

收稿日期: 2013-01-05

作者简介: 王秋霞(1989—), 女, 河南周口人, 硕士生, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究。

型能够在误差允许范围内模拟高速电磁阀的工作。为今后高速电磁阀特性的研究和航空发动机电子控制系统的仿真分析提供了有价值的参考。

## 1 高速电磁阀的工作原理及工作特性

### 1.1 高速电磁阀介绍

作为一种快速响应式开关阀,高速电磁阀是电子机构与机械液压机构间的理想接口元件<sup>[11-12]</sup>,常应用于机电液一体化系统中。高速电磁阀工作时主要有开和闭两种状态。通过改变工作周期内阀的开与闭时间比例,可实现对工作周期内介质通过量的控制。作为衡量电磁阀的重要指标,额定流量和动作时间直接影响到系统的稳定性和可控性,电磁阀额定流量的增大及动作时间的加快会降低系统的控制精度和稳定性。高速电磁阀的特点是:结构紧凑、质量轻、体积小、动作准确、内泄漏小、抗污染能力强等<sup>[13]</sup>。近年来,高速电磁阀在航空发动机控制系统中的应用日趋广泛。

### 1.2 高速电磁阀的结构及工作原理

在结构上,高速电磁阀主要有挡板活门、活门弹簧、活门垫圈、铁心弹簧、线圈组件、铁心组件、壳体组件等组成<sup>[14]</sup>,其基本结构如图1所示。

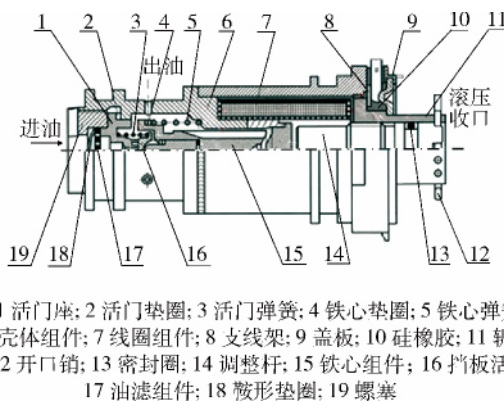


图1 高速电磁阀结构图

Fig. 1 Structure chart of high speed solenoid valve

高速电磁阀的开与闭靠高低电平来驱动,在线圈组件7两端施加驱动电流后,根据电磁感应原理,线圈中电流的变化会使周围磁场产生变化,在磁场力的作用下,铁心组件15克服铁心弹簧5的弹力而向右运动,在活门弹簧3回复力的作用下,喷嘴挡板活门16向右运动,挡板活门打开。当线圈组件7中的电流低于临界值时,由于所受磁场力不足以克服铁心弹簧力,铁心组件15在铁心弹簧力的作用下向左移动,挡板活门16关闭。

### 1.3 高速电磁阀的工作特性

本文所研究的高速电磁阀驱动电流波形如图2所示。从图中可以看到,驱动电流波形为阶梯波叠加三角颤振波的形式<sup>[15]</sup>。阶梯波形电流可以保证在不降低安全系数的条件下,大幅度降低电磁活门的功耗,并且温升小,效率高;而三角颤振波减小了电磁活门的摩擦滞环,对提高高速电磁阀的响应速度和控制精度十分有益<sup>[16]</sup>。典型驱动电流波形见图2。

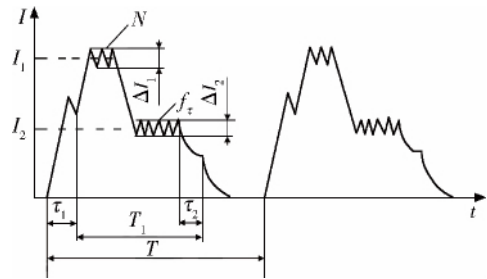


图2 高速电磁阀驱动电流波形

Fig. 2 Drive current wave form for high speed solenoid valve

图2中电流的占空比可表示为 $s = T_1/T \times 100\%$ 。 $I_1$ 为强激电流; $I_2$ 为维持电流; $\Delta I_1$ 为强激颤振电流; $\Delta I_2$ 为维持颤振电流; $N$ 为振荡次数; $\tau_1$ 为吸合时间; $\tau_2$ 为释放时间; $f_\tau$ 为颤振频率; $T$ 为工作周期; $T_1$ 为高电平时间。

给高速电磁阀通电之前,阀门处于关闭状态。按图2所示波形给电磁阀的线圈通电,在强激电流的作用下,电磁阀开启,安全开启之后电磁阀在维持电流的作用下处于开启状态,当驱动电流小于维持电流时,电磁力不足以克服铁心弹簧力,电磁阀关闭,这样就完成了一个周期的高速电磁阀工作过程。

工作过程中,喷嘴挡板阀在控制信号的作用下持续进行开、闭动作,其出口介质的流量也呈现脉动状态,因此阀的流量为脉动的平均流量。流量的大小与驱动电流信号的占空比有关,占空比越大,阀门打开的时间越长,流量也越大。驱动电流的频率越高,受控介质脉动量越小,流量越接近平均流量。

## 2 高速电磁阀数学模型分析

AMESim 软件平台中的物理模型参数的调整与设置需基于模型对象底层的数学模型,对高速电磁阀建模仿真之前,首先需要分析高速电磁阀的数学模型,在此基础上进行物理模型搭建,可

以合理高效地设置模型参数,对物理模型进行优化及故障分析与检测.本节将对高速电磁阀的核心部件及概念进行数学模型分析.

### 2.1 磁心模型

系统中磁心的工作效果主要取决于形状和材料,根据材料的不同,以磁通密度  $B$  及磁场强度  $H$  为变量建立磁心工作数学模型,如式(1).

$$B = \mu_0 \left\{ H + M_s \cdot \tanh \left[ \frac{H + \epsilon \left( \frac{B}{\mu_0} - H \right)}{a} \right] \right\} \quad (1)$$

式(1)中  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m;  $M_s$  为饱和磁化强度;  $\epsilon$  为量化的主要作用参数;  $a$  为形状参数.

对于标准的高速电磁阀数学模型,主要作用参数  $\epsilon$  通常设默认值为 0,根据高速电磁阀磁心材料的不同,常需通过查表计算来设置饱和磁化参数  $M_s$  与形状参数  $a$ .

### 2.2 涡流模型

高速电磁阀工作过程中,涡流将造成磁通量的延迟和损失,涡流的影响不能忽略.涡流可看作一个单绕组的磁势电压源,磁势电压  $\lambda$  可用式(2)表示.

$$\lambda = f(\phi) + \lambda_{\text{eddy}} = f(\phi) + \frac{\dot{\phi}}{R_{\text{eddy}}} \quad (2)$$

式(2)中  $\phi$  为磁通量;  $\dot{\phi}$  为磁通量变化率;  $\lambda_{\text{eddy}}$  为涡流磁势电压,  $R_{\text{eddy}}$  为涡流电阻.

模型中参数  $K_{\text{eddy}}$  的设置用于反映涡流效应,其数值的大小依据式(3)进行计算.

$$K_{\text{eddy}} = \frac{1}{R_{\text{eddy}}} = \frac{\sigma \cdot A_e}{l_e} \quad (3)$$

式(3)中  $\sigma$  为材料的电导率;  $l_e$  为有效涡流通路;  $A_e$  为横截面.

### 2.3 气隙模型

在高速电磁阀建模过程中,气隙是一个非常重要的设置参数.不同形状的气隙模型的参数设置往往有较大不同,典型的气隙模型主要有圆柱形与圆锥形两种,数学模型见式(4)、式(5).

圆柱形气隙模型

$$R = \frac{1}{\mu_0 \cdot d \left( \frac{\pi \cdot d}{4x} + \beta \right)} \quad (4)$$

圆锥形气隙模型

$$R = \frac{1}{\mu_0 \cdot d \left( \frac{\pi \cdot d}{4x \sin^2 \alpha} - \frac{\gamma}{\sin^2 \alpha} + \beta \right)} \quad (5)$$

式中  $d$  为圆柱(锥)直径;  $x$  为气隙宽度;  $\beta, \gamma$  为修正系数;  $\alpha$  为半锥角.

## 3 基于 AMESim 仿真平台的高速电磁阀建模与仿真

### 3.1 高速电磁阀物理模型建立

高速电磁阀涉及机、电、液多领域知识,很难建立起精确的数学模型,考虑到 AMESim 的特点,本文基于 AMESim 软件平台建立高速电磁阀的物理模型.

高速电磁阀由电磁部分和喷嘴挡板阀部分组成,详细结构图见图 1. 在分析高速电磁阀结构和原理的基础上,结合电磁库中元件的特点,建立电磁部分的模型如图 3 所示. 其中电磁线圈用线圈模型 1 模拟,轭铁用固定长度的磁性元件 2 模拟,轭铁两端的径向磁路部分用径向磁性元件模型 3 模拟,磁节点用模型 4 模拟,壳体组件用磁性元件模型 5 模拟,铁心和径向元件间的磁漏用磁漏模型 6 模拟,壳体组件和铁心组件之间的磁漏用磁漏模型 7 模拟,铁心组件用固定长度的磁性元件 8 模拟,零磁势点用模型 9 模拟,工作气隙用圆锥形气隙模型 10 模拟,固定铁心用磁性元件模型 11 模拟,非工作气隙用圆柱形气隙模型 12 模拟,调整杆用磁性元件模型 13 模拟. 轭铁和调整杆之间的漏磁用磁漏模型 14 模拟,轭铁和壳体组件之间的漏磁用磁漏模型 15 模拟. 轭铁和非工作气隙之间、轭铁和铁心之间及径向磁路和铁心的空隙之间存在漏磁,因此轭铁模型的建立采用了 3 个轴向磁元件串联的形式,由磁路的基本原理可知,这样不会改变主磁路<sup>[17]</sup>.

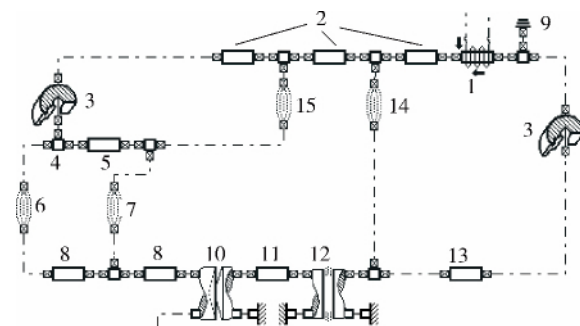


图3 高速电磁阀中电磁部分的模型

Fig. 3 Model of electromanetic component in high speed solenoid valve

根据电磁活门的结构和原理,高速电磁阀工作时,在电磁力的作用下,工作气隙减小,带动铁

心组件向右运动,进而挡板活门打开,通往执行活门上腔的油路增大.喷嘴挡板阀的模型如图4所示.

图4中模块1模拟活门弹簧,模块2模拟挡板活门的质量,模块3模拟挡板活门,模块4模拟挡板右侧的容腔,模块5模拟挡板右侧与铁心组件左侧的刚性元件,模块6模拟铁心组件左侧的油腔,模块7模拟铁心组件左侧的泄漏,模型8模拟铁心组件右侧的弹簧腔,模块9模拟铁心组件质量,模块10模拟铁心表面的油槽.图中P表示定压燃油,Ch表示容腔.

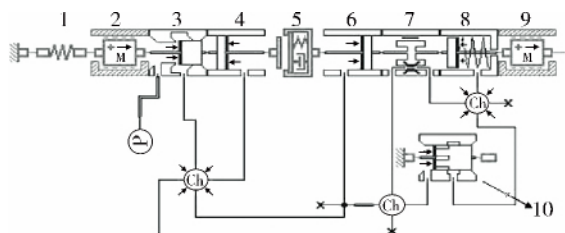
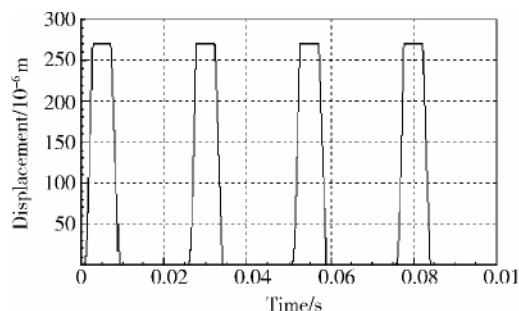


图4 高速电磁阀中喷嘴挡板阀的模型

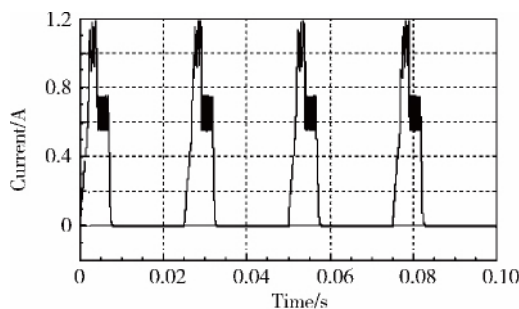
Fig.4 Model of nozzle flapper valve in high speed solenoid valve

### 3.2 高速电磁阀数学模型仿真

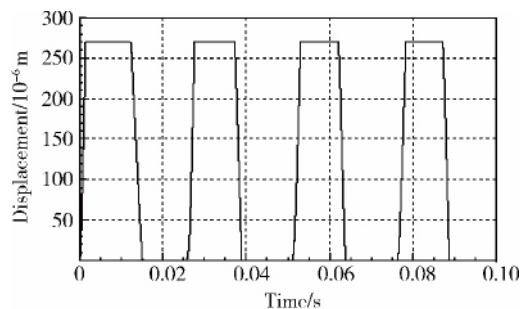
驱动信号的频率保持为40 Hz不变,运行参数设置:仿真时间为0.1 s,采样间隔为0.01 ms.当输入驱动信号的占空比不同时,高速电磁阀阀心位移和驱动电流的波形如图5所示.



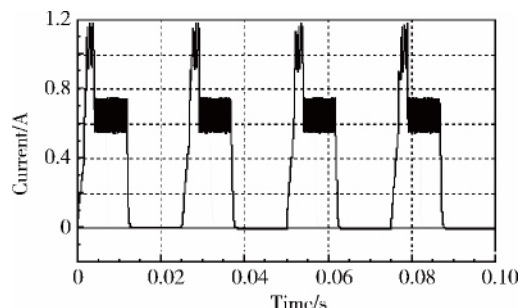
(a) 占空比 $s=0.2$ 的位移



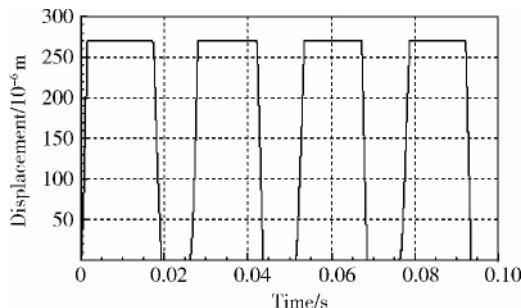
(b) 占空比 $s=0.2$ 的驱动电流



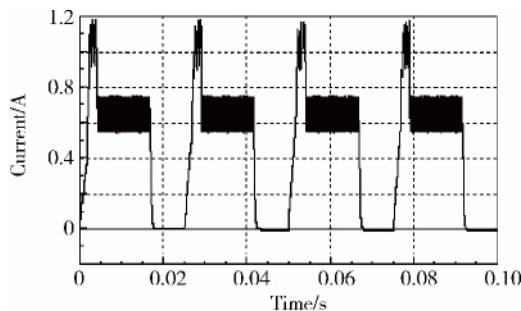
(c) 占空比 $s=0.4$ 的位移



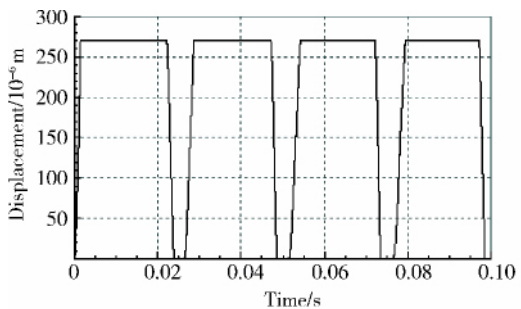
(d) 占空比 $s=0.4$ 的驱动电流



(e) 占空比 $s=0.6$ 的位移



(f) 占空比 $s=0.6$ 的驱动电流



(g) 占空比 $s=0.8$ 的位移



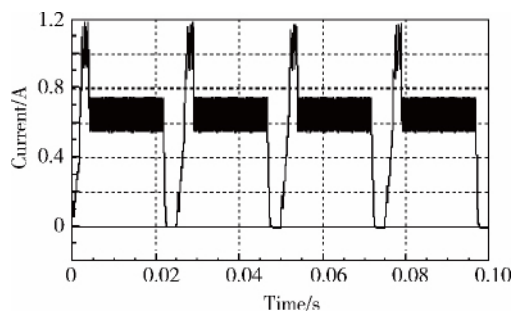
(h) 占空比 $s=0.8$ 的驱动电流

图5 高速电磁阀阀心位移和驱动电流信号仿真图

Fig. 5 Simulation chart for displacement of valve core of high speed solenoid valve and drive current signal

从仿真图中可以看出:输入占空比信号不同,驱动电流的高电平时间也就不同,但是强激电流时间基本保持不变,变化的只是维持电流的时间,这对于减少能量消耗是有意义的。

### 3.3 高速电磁阀占空比-流量特性分析

输入一个占空比信号,就有一个电磁活门打

开的时间与之对应,当高速电磁阀前后压差一定时,电磁活门的输出流量的平均值随占空比的变化而变化,也就是说一个占空比信号对应一个高速电磁阀的平均流量,而系统对变频控制的高速电磁阀的占空比-流量特性有一定的要求,对所建立的高速电磁阀数学模型的占空比-流量特性能否满足要求进行验证。

产品要求的占空比-流量特性及精度要求如表1所示。用 MATLAB 软件画出技术要求所规定的占空比-流量特性曲线及允许的误差范围,与系统建模仿真得到的占空比-流量特性做出比较。仿真曲线如图6所示。

从图6可以看出本文建立高速电磁阀数学模型的占空比-流量特性在要求的范围之内:在占空比为20%时,流量误差在8%以内;占空比为50%时,流量误差在5%以内;占空比为80%时,流量误差在8%以内;占空比为100%时,流量误差在8%以内。所建模型能够比较准确地仿真高速电磁阀的特性。

表1 占空比-流量特性表

Table 1 Characteristic list of duty ratio-volume flow

占空比 $s/\%$	0	20	50	80	100
流量 $q_V/(\text{mL}/\text{min})$	3	$(0.2 \pm 8\%)q_{V,\max}$	$(0.5 \pm 5\%)q_{V,\max}$	$(0.8 \pm 8\%)q_{V,\max}$	$q_{V,\max} = 760_{-50}^{+120}$

注:① 产品进出口压差应为  $\Delta p = (1 \pm 0.1) \text{ MPa}$ ; ②  $q_{V,\max}$  是占空比为100%时的实际流量; ③ 燃油温度  $t = (25 \pm 10)^\circ\text{C}$ 。

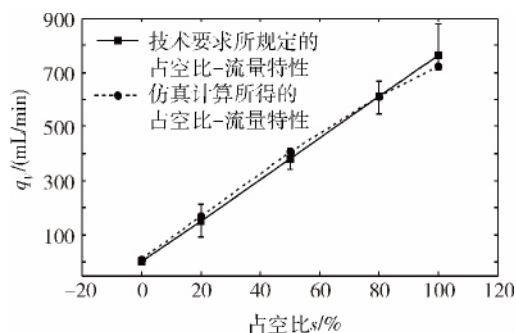


图6 高速电磁阀的占空比-流量特性图

Fig. 6 Duty ratio-volume flow characteristic chart for high speed solenoid valve

## 4 结 论

本文针对某型航空发动机用高速电磁阀,在深入了解其结构及工作原理的基础上,利用 AMESim 的系统建模、仿真及动力学分析功能,建立了该型发动机控制系统中高速电磁阀的较为

精确的数学模型。对模型和实物的占空比-流量特性进行了分析比较。结果表明:所建立的 AMESim 高速电磁阀数学模型能够在误差允许范围内模拟高速电磁阀。这为以后对高速电磁阀的研究及航空发动机电子控制系统的仿真分析提供了有价值的参考。

## 参考文献:

- [1] 樊思齐. 航空发动机控制[M]. 西安:西北工业大学出版社,2008.
- [2] 李立国. 高速电磁阀的仿真与实验研究[D]. 北京:清华大学,2008.  
LI Ligu. Simulation analysis and experimental study on the solenoid valve of electronic unit pump[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese)
- [3] Passarini L C, Nakajima P R. Development of a high-speed solenoid valve; an investigation of the importance of the armature mass on the dynamic response[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2003, 25(4): 329-335.

- [4] 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.
- [5] 彭凯,樊丁,李杰,等. 航空发动机导叶模糊控制器设计与参数优化[J]. 航空动力学报,2011,26(4):942-946.  
PENG Kai,FAN Ding,LI Jie,et al. Simulation and parameter optimization for aeroengine compressor guide vane fuzzy regulator[J]. Journal of Aerospace Power,2011,26(4):942-946. (in Chinese)
- [6] 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 Zhengpeng,et al. Failure analysis and parameter optimization for fuel distributor of certain aeroengine [J]. Journal of Propulsion Technology,2011,32(2):276-281. (in Chinese)
- [7] 夏胜枝,周明,李希浩,等. 高速强力电磁阀的动态响应特性[J]. 清华大学学报:自然科学版,2002,42(2):259-264.  
XIA Shengzhi,ZHOU Ming,LI Xihao,et al. Dynamic response characteristics of high-speed, powerful solenoid valve[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology,2002,42(2):259-264. (in Chinese)
- [8] 杨玉涛,张小栋. 高速电磁阀模型建立及响应特性研究[J]. 测控技术,2008,27(6):86-89.  
YANG Yutao,ZHANG Xiaodong. Study on mathematical modeling and response characteristics of high-speed solenoid valve[J]. Measurement and Control Technology,2008,27(6):86-89. (in Chinese)
- [9] 邹开凤,陈友龙. 高速电磁阀响应特性的研究[J]. 海军航空工程学院学报,2005,20(6):671-675.  
ZOU Kaifeng,CHEN Youlong. Study of response trait of high-speed solenoid valve[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute,2005,20(6):671-675. (in Chinese)
- [10] 任新宇,王建礼,赵小龙. 基于 AMESim 的涡扇发动机控制综合仿真[J]. 航空动力学报,2010,25(12):2816-2820.  
REN Xinyu,WANG Jianli,ZHAO Xiaolong. Simulation of turbofan engine main fuel control system based on AMESim[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(12):2816-2820. (in Chinese)
- [11] 林锐. 高速开关阀的研究及数字仿真[D]. 武汉:武汉理工大学,2005.  
LIN Rui. Research and digital simulation of high-speed on-off valves[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2005. (in Chinese)
- [12] 施光林,钟廷修. 高速电磁开关阀的研究与应用[J]. 机床与液压,2001(2):68-72.  
SHI Guanglin,ZHONG Tingxiu. On the researches of high speed solenoid on/off valve and its applications[J]. Machine Tool and Hydraulics,2001(2):68-72. (in Chinese)
- [13] 苏明,陈伦军. 基于 AMESim 的电磁高速开关阀动态特性研究[J]. 液压与气动,2010(2):68-72.  
SU Ming,CHEN Lunjun. Dynamic characteristic research of high speed on-off solenoid valve based on AMESim[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics,2010(2):68-72. (in Chinese)
- [14] 周宗才. 苏 27 飞机推进系统控制[M]. 西安:中国人民解放军空军装备技术部,1997.
- [15] 苏岭,柳泉冰. 脉宽调制保持电磁阀驱动参数的研究[J]. 西安:西安交通大学学报,2005,39(7):689-692.  
SU Lin,LIU Quanbing. Experimental investigation on parameters of pulse width modulation-holding solenoid valve drive mode[J]. Xi'an:Journal of Xi'an Jiaotong University,2005,39(7):689-692. (in Chinese)
- [16] 谢寿生. AI-31Φ 加力涡扇发动机[M]. 西安:空军工程学院出版社,2002.
- [17] 王以真. 实用磁路设计[M]. 北京:国防工业出版社,2008.