

步进电机驱动的燃油计量装置建模与仿真

曹启威, 王 彬, 赵皓岑, 叶志锋

(南京航空航天大学 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘要: 为了开发数控燃油计量装置独立仿真平台, 利用 AMESet 建立了基于 C 代码的步进电机部件模型; 对建立的步进电机模型进行仿真, 获得了其转角随输入脉冲的关系。建立了由计量活门、等压差活门、增压活门等组成的燃油计量装置机械液压组件 AMESim 模型, 将开发的步进电机模型与计量装置各液压组件模型联结, 实现了步进电机驱动的数控燃油计量装置面向对象的建模。仿真结果表明: 在正常工作范围内, 仿真结果与设计参考偏差在 5% 以内, 所开发的 AMESim 模型能满足该数控计量装置的稳态和动态特性的研究要求。

关键词: 燃油计量装置; 步进电机; AMESet; 等压差活门; 航空发动机

中图分类号: V228.1+2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2016.05.004

Modeling and Simulation of Fuel Metering Unit Driven by Stepping Motor

CAO Qi-wei, WANG Bin, ZHAO Hao-cen, YE Zhi-feng

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to develop a independent simulation platform for digital control Fuel Metering Unit (FMU), a C program was established to describe the stepping motor in AMESet and obtain the component level model. Simulation using the developed model in AMESim gives the relationship between rotation angle and input pulse of the motor. FMU composed mainly of metering valve, constant pressure difference valve and booster valve were modeled in AMESim. Coupling of the developed motor model and the model of hydromechanical components achieved the entire object-oriented modeling of the digital control FMU driven by stepping motor. Simulation results show that a deviation between simulation results and design reference value is no more than 5% within usual operating range, and AMESim model developed can satisfy the requirements for study on steady-state and dynamic characteristics of the unit.

Key words: fuel metering unit; stepping motor; AMESet; constant pressure difference valve; aeroengine

0 引言

在航空发动机技术进步和性能提升过程中, 燃油与控制系统也由简单到复杂、由液压机械控制发展到全权限数字电子控制(FADEC)^[1-2]。新型航空发动机的控制系统拟采用无液压机械备份的双通道 FADEC, 燃油系统则采用新型燃油泵和计量原理, 可部分取代现有系统^[3-5]。目前, 液压执行机构仍是不可缺少的组成部分, 逐步实现数字控制、提高可靠性和动态性能是行业公认的研发方向^[6-7]。数控燃油计量装置是 FADEC 系统重要执行机构之一, 开发高精度仿真模型在研制中有重要工程意义。针对燃油系统在不同平台

上已有诸多研究成果, 如利用 Matlab/Simulink 建立了部件模型库, 并对航空发动机控制系统进行了仿真^[8]。

AMESim 作为 1 种应用广泛的机电液系统建模仿真平台受到越来越多发动机燃油系统研发用户的青睐^[9-10]。但不同行业在应用需求上存在差异, 通常难以提供全部所需的元件 / 部件级模型, 用户或多或少需要自行开发相应的模型, 用于系统级建模与仿真。如通过联合仿真接口在 AMESim 中调用 Matlab/Simulink 开发的部件模型^[11], 这不仅增加了工作量且不可避免地产生仿真延时, 不利于工程应用推广。步进电机是数控燃油计量装置常见的电驱动控制元件, 目前 AMESim 软件无法提供对应的模型, 限制了整

收稿日期: 2016-01-14 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(NJ20150009)资助

作者简介: 曹启威(1993), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为航空发动机燃油系统及测试技术; E-mail: 15605182881@163.com。

引用格式: 曹启威, 王彬, 赵皓岑, 等. 步进电机驱动的燃油计量装置建模与仿真[J]. 航空发动机, 2016, 42(5): 21-25. CAO Qiwei, WANG Bin, ZHAO Haocen, et al. Modeling and simulation of fuel metering unit driven by stepping motor[J]. Aeroengine, 2016, 42(5): 21-25.

个数控计量装置的一站式建模及仿真结果的置信度。

本文利用 AMESet 开发了步进电机的图形化模型,并与主要部件的液压模型联结,实现了数控计量装置的一站式建模与仿真,既可节省用户自行根据数学模型建模的时间,也可减小采用多软件联合仿真可能产生的误差,为建立直观、便捷、高置信度的数控燃油计量装置面向对象的动力学模型提供了技术途径。

1 数控燃油计量装置组成

燃油计量装置是燃油量自动控制的执行机构。本文研究的数控燃油计量装置主要由等压差活门、定压活门、计量活门、步进电机和角位移传感器等元件组成,组成原理如图 1 所示。等压差活门保持计量活门进、出口压差基本不变,经过计量活门的燃油流量就惟一地由计量活门的开口面积决定,主要通过步进电机控制。

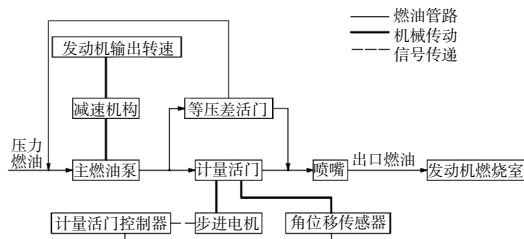


图 1 燃油计量装置原理

2 步进电机工作原理

步进电机作为燃油计量装置的驱动部件,受电脉冲信号的控制以固定角度旋转。步进电机接收到 1 个脉冲信号转动 1 个固定角度,即步距角。为实现准确定位,通过改变提供给步进电机的脉冲数来控制角位移量;而为实现调速,可以改变提供给步进电机的脉冲频率来调节其转动角速度和角加速度。因此,步进电机具有定位精度高、调速范围宽、动态力矩大、控制简单等显著特点^[12]。由于步进电机的输入是矩形脉冲序列,为数字量,故适合用数字控制电路控制。步进电机输出转角与输入脉冲信号成线性关系,且输出角位移无累积误差,所以航空发动机数控系统燃油计量装置可采用步进电机作为驱动与控制元件^[13]。

3 数学模型

该系统分为步进电机和燃油计量装置 2 部分,系统的稳态、动态性能主要由这 2 部分决定。

其中,步进电机的数学模型由 3 个方程组成,分

别是电压平衡方程、电磁转矩方程和机械系统的运动方程

$$U(t) = RI(t) + L_0 \frac{dI(t)}{dt} + L_1 \cos(N_r \theta) \frac{dI(t)}{dt} - L_1 N_r \sin(N_r \theta) I(t) \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m i_k^2 \frac{dL_k}{d\theta} \quad (2)$$

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_1 \quad (3)$$

式中: $U(t)$ 为施加于步进电机该相的矩形脉冲电压, V ; R 为该相绕组的电阻, Ω ; $I(t)$ 为该相绕组的电流, A ; N_r 为步进电机的齿数; L_0 为绕组的平均电感, H ; L_1 为绕组电感的基波分量, H ; T_e 为电磁转矩, $N \cdot m$; J 为转子系统的转动惯量, $kg \cdot m^2$; B 为机械系统的阻尼系数, $N \cdot m \cdot s$; T_1 为负载转矩, $N \cdot m$ 。

计量活门进、出口压力在一定范围内变化时,等压差活门可以通过调节回油口的开度使压差保持在调定值附近,其中压差大小通过弹簧的预紧力调节^[14-15]。根据弹簧力与压差力的平衡关系可建立力平衡方程

$$(P_1 - P_2) \frac{\pi}{4} D_{yc}^2 = F_{yc} + K_{yc} x_{yc} \quad (4)$$

式中: P_1 、 P_2 分别为计量活门进、出口压力, MPa ; D_{yc} 为等压差活门阀芯的有效直径, mm ; F_{yc} 为等压差活门的弹簧预紧力, N ; K_{yc} 为等压差活门的弹簧刚度, N/mm ; x_{yc} 为等压差活门的弹簧变形量, mm 。

对于计量活门,燃油流量的计算公式为

$$Q_2 = C_d A \sqrt{2\Delta P / \rho} = C_d A \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho} \quad (5)$$

式中: Q_2 为燃油质量流量, g/s ; C_d 为流量系数; A 为计量活门节流口开口面积, m^2 ; ρ 为燃油密度, kg/m^3 ; ΔP 为计量前后压差, Pa 。

4 AMESim 建模

为获得该装置面向工程应用的 AMESim 模型,首先解决模型库中缺乏步进电机模型问题。

4 相反应式步进电机有 5 个端口,其中 4 个端口分别为 A、B、C、D 4 相,各相为电压输入,另一端口为输出角度及角速度。各端口外部变量设置见表 1。

对应 4 相电压,设置内部变量 4 相电流,见表 2。

根据步进电机数学模型,设置实型参数,见表 3。

在 AMESet 环境下设定了对应的参数及变量后,根据上文的步进电机数学模型,编写基于 C 语言的

表 1 端口外部变量设置						
Field	Port 1	Port 2	Port 2	Port 3	Port 4	Port 5
		Variable 1	Variable 2			
Type	basic variable	explicit variable	explicit variable	basic variable	basic variable	basic variable
Unit	V	rad	rad/s	V	V	V
Variable name	U_1	theta	ω	U_2	U_3	U_4
Variable derivative name	—	dtheta	d ω	—	—	—

表 2 内部变量设置				
Field	Internal Variable1	Internal Variable2	Internal Variable3	Internal Variable4
Type	explicit variable	explicit variable	explicit variable	explicit variable
Unit	A	A	A	A
Variable name	I1	I2	I3	I4
Variable derivative name	dI1	dI2	dI3	dI4
Dimension	1	1	1	1

表 3 实型参数设置							
Field	Real parameter1	Real parameter2	Real parameter3	Real parameter4	Real parameter5	Real parameter6	Real parameter7
Variable name	L_0	L_1	B	J	T_1	R	N_f
Unit	H	H	$N \cdot m \cdot s$	$kg \cdot m^2$	$N \cdot m$		Null
Default value	0.006	0.004	0.0001	0.00015	0	3	28

运行程序,最终生成步进电机的图形化封装模型,如图 2 所示。

燃油计量装置液压执行机构由计量活门、等压差活门和增压活门组成,AMESim 分别如图 3 所示。

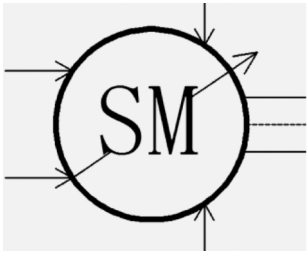


图 2 开发的步进电机
AMESim 模型

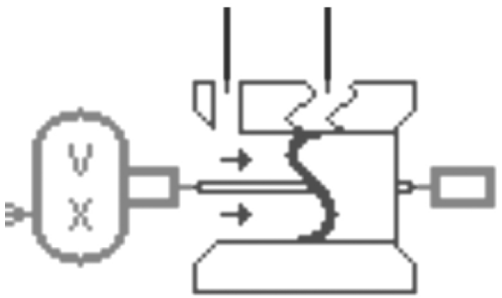
应用开发的步进电机图形化模型,对步进电机控制的燃油计量装置建立 AMESim 模型,如图 4 所示。

5 系统性能仿真

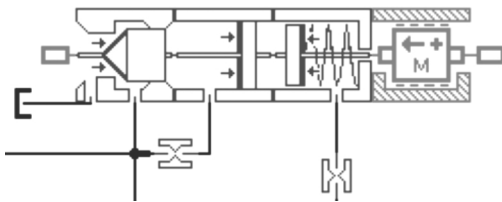
5.1 计量活门开度

系统指令信号与计量活门实际开度的对比如图 5 所示。

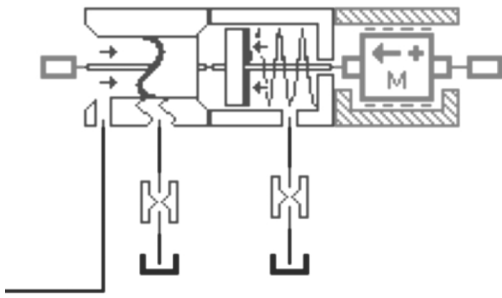
因步进电机具有响应速度快、无超调以及控制简单等优点,在阶跃信号以及频率较低的正弦信号下,



(a) 计量活门



(b) 压差活门



(c) 增压活门

图 3 其它主要元件模型

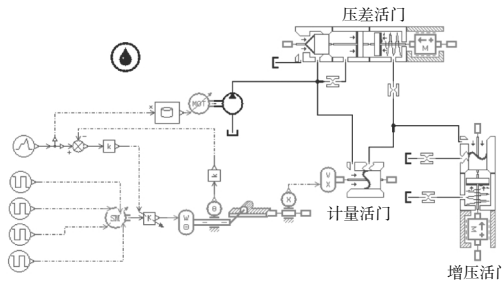
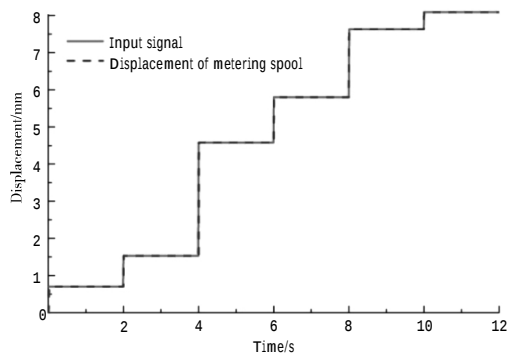


图 4 燃油计量装置的 AMESim 模型

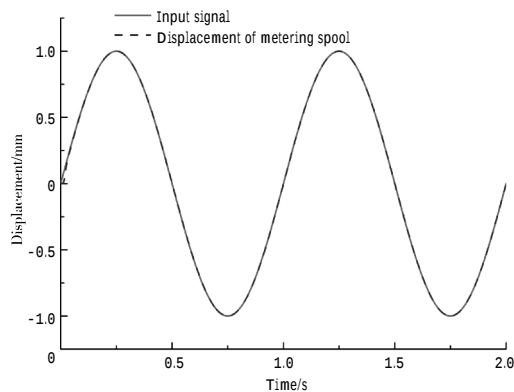
计量活门开度(即位移)响应与输入的位移控制信号近乎一致。图 5 中的曲线表明,步进电机驱动燃油计量装置的计量活门开度响应具有良好的动态及稳态特性,响应时间短,且无超调。

5.2 计量活门压差

压差活门的阀芯位移如图 6(a)所示;压差活门前、后压力 P_1 、 P_2 及压差 $P_1 - P_2$ 的仿真曲线如图 6(b)所示。当结构参数一定时,压差大小仅与压差活门调定弹簧的压缩量有关。要使压差不变,就要使调定弹簧的压缩量基本不变,即等压差活门的位移尽可能小。

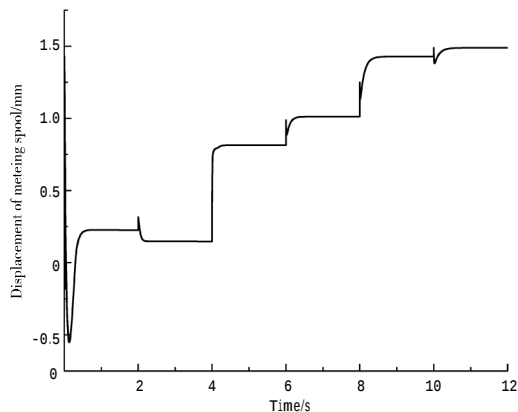


(a) 阶跃位移指令

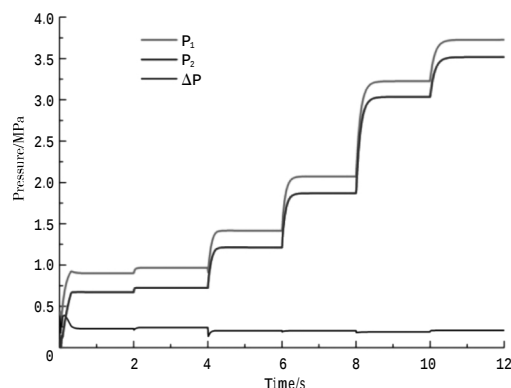


(b) 正弦位移指令

图 5 指令信号和计量活门位移



(a) 阀芯位移



(b) 前、后压力及压差

图 6 等压差活门性能曲线

但进、出口压力的波动又必须通过等压差活门的阀芯位移变化来调整回油量从而确保压差基本不变,因此压差实际只能保证基本不变,或变化对燃油量影响可忽略不计。

从图 6(a)中可见,在输入信号下,当供油压力发生正阶跃变化时,计量活门开度变化使进口压力变化,压差活门阀芯相对移动,调整回油量,从而相应使压差减小。当二者压差再次与弹簧力平衡时,等压差活门阀芯停止上移,压差保持在设定范围内(图 6(b)),说明本文所建等压差活门模型能描述其工作原理与过程,仿真结果可靠。

从图 6(b)中可见,最小压差约为 0.19 MPa,最大压差约为 0.24 MPa,压差基本保持在 0.22 MPa 左右,与该计量装置产品出厂报告一致。以上结果表明,压差活门可以保持 1 个相对稳定的计量活门前后压差。

5.3 燃油流量仿真

燃油流量仿真结果与装置的设计参考点对比如图 7 所示。

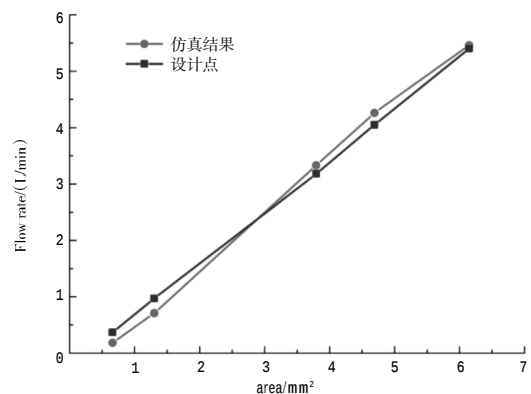


图 7 仿真结果与设计参考点对比

从图 7 中可见,基于该模型的仿真结果与产品出厂测试参考点的偏差在 5% 以内,满足燃油控制精度要求。个别小开度时的燃油量偏差较大,主要原因是设计参考值的测量偏差或计量活门在小开度时实际开口面积和阀芯位移的非线性关系等。

理论上,在压差恒定情况下燃油流量与计量活门的开口面积成正比。实际因等压差活门位移引起压差的微小变化、燃油泄漏等影响以及开口面积与位移的关系等因素,燃油流量与计量活门的开口面积并非严格成正比。

6 结论

通过对步进电机驱动的数控燃油计量装置建模

与仿真,得到如下结论:

(1)在 AMESet 环境下开发的步进电机图形化模型,可准确描述步进电机自身的工作过程,具有良好的动态及稳态特性;

(2)本文开发的电机模型用于整个装置面向对象的建模与仿真,相比于 AMESim/Matlab 联合仿真而言,具有方便、适用,精度高等优点;

(3)燃油计量装置的 AMESim 建模与仿真可用于分析系统性能,查看各控制部件的运动参数,为高性能设计与优化提供有效手段。

参考文献:

- [1] 张绍基.航空发动机燃油与控制系统的研究与展望[J].航空发动机,2003,29(3):1-5,10.
ZHANG Shaoji. Recent research and development of the fuel and control systems in an aeroengine [J]. Aeroengine, 2003, 29 (3): 1-5, 10. (in Chinese).
- [2] 张绍基.航空发动机控制系统的研发与展望 [J].航空动力学报,2004,19(3):375-382.
ZHANG Shaoji. A review of aeroengine control system [J].Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3):375-382.(in Chinese).
- [3] Link C J, Sanjay G. Propulsion control technology development in the United States-a historical perspective[R].NASA-TM-2005-213978.
- [4] 任士彬,孟庆明.中国发展航空发动机 FADEC 技术的途径[J].航空发动机,2010,36(3):53-55,29.
REN Shibin, MENG Qingming. Development approach of aeroengine FADEC technology in China[J]. Aeroengine,2010,36(3):53-55,29. (in Chinese).
- [5] 姚华,王国祥.航空发动机全权限数控系统研究和试飞验证[J].航空动力学报,2004,19(2):247-253.
YAO Hua, WANG Guoxiang. A study and flight evaluation of full authority digital engine control system [J]. Journal of Aerospace Power, 2004,19(2):247-253.(in Chinese)
- [6] 吴天翼,樊丁,杨帆,等.某型航空发动机 FADEC 系统设计与仿真[J].科学技术与工程,2012,12(1):106-111.
WU Tianyi, FAN Ding, YANG Fan, et al. Design and simulation of FADEC system of one certain type aeroengine [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(1):106-111.(in Chinese)
- [7] Calabrese M A, Skarbek L F, Shah P H, et al. Using a digital fuel control system and digital engine controller for US Navy LM2500 engines [J]. American Society of Mechanical Engineers, International Gas Turbine Institute, Turbo Expo (Publication) IGTI, 2002(2B):1035-1039.
- [8] 徐敏,王曦,曾德堂,等.现代航空发动机液压机械控制器仿真研究[J].航空动力学报,2009,24(12):2808-2813.
XYU Min, WANG Xi, ZENG Detang, et al. Simulation on hydromechanical controller of modern aeroengine [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(12):2808-2813.(in Chinese)
- [9] 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.
LI Kuo, GUO Yingqing. Application of AMESim in aero-power plant aystem[J]. Computer Simulation, 2009, 26(1): 107-110. (in Chinese)
- [10] 任新宇,王建礼,赵小龙.基于 AMESim 的涡扇发动机控制系统综合仿真,2010,25(12):2816-2820.
REN Xinyu, WANG Jianli, ZHAO Xiaolong. Imulation of turbofan engine main fuel control system based on AMESim [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(12): 2816-2820.(in Chinese)
- [11] Montazeri-Gh M, Nasiri M, Rajabi M, et al. Actuator based hardware-in-the-loop testing of a jet engine fuel control unit in flight conditions[J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2012, 21(1): 65-77.
- [12] 周一飞.基于 Simulink 的步进电机控制系统仿真[D].成都:西南交通大学,2014.
ZHOU Yifei. Simulation of stepping motor control system based on Simulink[D].Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [13] 王宗培,史敬灼.二相混合式步进电机仿真模型分析[J].特微电机,1998(1):4-8.
WANG Zongpei, SHI Jingzhuo. Analysis of the 2-phase hybrid stepping motor's model [J]. Small and Special Machines, 1998(1):4-8. (in Chinese)
- [14] 张力,李文飞,赵玉贝,等.基于 AMESim 的定差减压阀建模与仿真[J].机械工程与自动化,2013(5):58-60.
ZHANG Li, LI Wenfei, ZHAO Yubei, et al. Modeling and simulation of uniform pressure drop valve based on AMESim[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2013(5):58-60.(in Chinese)
- [15] 尚洋,郭迎清,王骥超,等.涡扇发动机加力燃油计量装置建模与性能分析[J].航空发动机,2013,39(5):47-50.
SHANG Yang, GUO Yingqing, WANG Jichao, et al. Modeling and performance analysis of augmented-fuel metering unit for turbofan engine[J]. Aeroengine, 2013, 39(5):47-50. (in Chinese)

(编辑:赵明菁)