

文章编号:1000-8055(2012)02-0450-07

空气涡轮起动机调压装置 AMESim 建模与仿真

孙牧桥¹, 苏三买¹, 成 剑², 宋瑞涛¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 410003)

摘 要: 根据空气涡轮起动机 ATS(air turbine starter)系统中调压装置(该装置为一个多气动部件组成的压力闭环控制系统)的结构特点及工作原理,通过理论分析建立了其数学模型,采用模块化方法设计了调压装置的 AMESim 仿真模型.以某型 ATS 为应用对象,分别在斜坡输入、随机方波输入、阶跃输入及正弦输入下进行系统输出压力仿真.结果显示在不同输入下的压力输出基本恒定,典型工作状态仿真数据与试验数据比较,误差小于 3%,表明建模方法是正确的,所建模型可满足工程要求.

关 键 词: 空气涡轮起动机; 调压装置; AMESim; 模块化; 建模与仿真

中图分类号: V233.6

文献标志码: A

Air turbine starter pressure controller modeling and numerical simulation based on AMESim

SUN Mu-qiao¹, SU San-mai¹, CHENG Jian², SONG Rui-tao¹

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 410003, China)

Abstract: Based on the structure and principle of pressure controller (which is a pressure feedback control system composed of several pneumatic components) of air turbine starter system (ATS), the mathematic model was established through theoretical analyze. Then a pressure control system simulation platform was developed based on the AMESim simulation environment by using the modularization modeling method. Take a kind of ATS as the object for simulation, the pressure characteristics was simulated by giving ramp signal, random square wave signal and sine signal. The result show that output pressure can maintain within required range, and compared with the test data of typical operation state, the simulation error is less than 3%. The model of pressure controller is suitable for engineering.

Key words: air turbine starter; pressure controller; AMESim; modularization; modeling and simulation

在现代大型飞机中,主发动机通常通过辅助动力装置 APU(auxiliary power unit)引压缩空气经输气管路驱动空气涡轮起动机 ATS(air tur-

bine starter)旋转输出扭矩,再经减速器减速增扭后带转启动^[1-4],其中 ATS 的性能决定了发动机的起动性能,其输出扭矩直接决定发动机的起动

收稿日期:2011-08-02; 修订日期:2011-12-04

基金项目:航空科学基金(20100653006); APTD 项目(APTD 0401-01)

作者简介:孙牧桥(1986—),男,河南淅川人,硕士生,主要从事航空发动机建模与仿真研究.

能力。

由于受飞行环境影响,APU 引气出口参数并非恒定^[5-6],如何在变化的引气参数条件下保证要求的功率输出是 ATS 重要的技术指标。

目前,ATS 在结构上分为带调压装置和无调压装置两种类型^[7],其中带调压装置的 ATS 可以保持涡轮导向器前的压力稳定,当引气气源压力波动时仍能保证主发动机正常、可靠启动,同时可以降低对气源的要求。由于带调压装置的 ATS 具有以上优点,现代大型飞机广泛应用该结构形式的 ATS,而此类 ATS 也将是今后发展和应用的主流。

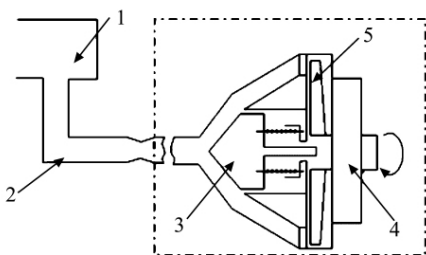
大型飞机设计,其中主发动机启动性能分析是一项关键技术^[8],理论计算需要建立 APU^[5]、引气管路、ATS 共同匹配工作的数学模型,其中 ATS 建模是重要的组成部分,而国内特别是对 ATS 以往研究工作与文献甚少。

带调压装置的 ATS 主要包括进气装置、调压装置、空气涡轮、减速器等部件,其中调压装置的是系统核心也是建模的难点。

基于上述背景,本文在理论分析基础上,以 AMESim 软件为平台,采用模块化建模方法,对 ATS 的调压装置进行建模方法研究^[9-11],并进行性能仿真,最后以某型 ATS 试验数据验证所建模型的工程适用性。

1 主发动机启动与 ATS 工作原理

如图 1,飞机主发动机启动系统主要由辅助动力装置 APU、引气管路及空气涡轮起动机 ATS 组成。APU 输出具有一定压力和温度的压缩空气,驱动 ATS 涡轮转子旋转,涡轮的高转速、低扭矩工作状态经减速器转变成输出轴处的低转速、大扭矩工作状态,输出轴带动主发动机转动。



1 APU; 2 引气管路; 3 调压装置; 4 减速器; 5 涡轮

图 1 飞机启动系统原理图(虚框内为 ATS)

Fig. 1 Principle of aircraft start system

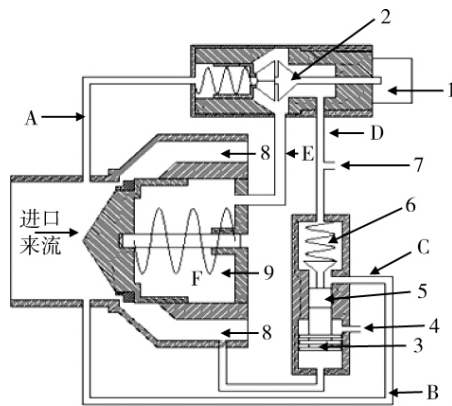
达到假开车、冷运转、启动主发动机的目的。

ATS 的涡轮通常为单级轴流式,工作时涡轮膨胀比在临界状态以上,换算空气流量保持不变,其转速、功率输出决定于导向器前气流的总温、总压。

调压装置是一个由多个机械气动元件组成的压力闭环控制系统,结构复杂,其工作处于动态变化过程,其作用是将压力变化的进气气流调节为涡轮导向器前的恒压气流。

2 调压装置结构及特点

调压装置位于 ATS 进气装置后端,主要由壳体、锥形塞组成的主节气门、柱塞、弹簧、定压活门、节流孔及空气管路组成,其结构原理如图 2 所示。



1 电磁铁; 2 电磁活门顶杆; 3 柱塞; 4 通大气孔;
5 定压活门顶杆; 6 调压腔; 7 节流孔;
8 调压气出口(涡轮导向器前);
9 锥形塞后腔 F; 10 气流通路 A, B, C, D, E

图 2 调压装置结构示意图

Fig. 2 Schematic of pressure controller

在气流作用下,调压装置通过改变锥形塞两端的压差,使锥形塞左右移动,进而改变气流的流通面积而保持涡轮导向器前的压力稳定。其工作原理如下:

当起动机不工作时,电磁活门顶杆位于最右端,切断通路 D—E,锥形塞后腔 F 经通路 E—A 与起动机进口连通。F 腔内压力与起动机进口压力相等,锥形塞在弹簧力的作用下紧压在壳体上,将来流通路截断。

当起动机工作后,电磁铁 1 推动电磁活门顶杆 2 使活门推至最左端,将 A 通道关闭。涡轮导向器前(出口 8)压力增大时,调压装置中柱塞 3 受力将增大,于是柱塞上移推动定压活门顶杆 5,克服弹簧力使调压腔 6 活门上移,打开进气口经

过 B—C—D—E 通气管到锥形塞后腔 F 的通路。F 腔内压力增大, 锥形塞前移, 进气环形面积减小, 气流节流, 使得调压装置出口压力下降, 直到压力达到规定值为止。当导向器进口压力小于规定值时, 调节过程相反。

根据进气压力波动, 调压装置的锥形塞、活塞、弹簧、活门等处于动态变化中。其中调压装置的规定压力通过调压腔 6 的弹簧预紧力设定。

常规的溢流阀或减压阀结构简单, 通常由一个弹簧和阀门组成。压力大于设定值阀门打开, 放出一部分气体到大气或回低压区, 将造成能量损失, 此外调压精度差。ATS 采用多个部件组成的组合式调压装置, 调节精度高, 并且使涡轮导向器前周向压力分布更均匀, 不影响涡轮的正常工作。

3 调压装置建模

为了准确地建立系统的 AMESim 建模, 首先建立各部件的数学模型, 清楚各部件的功能及计算机理, 然后在 AMESim 库中选取相应的模块, 建立系统的 AMESim 模型。

在 ATS 进口压力波动的情况下, 调压装置各部件处于动态平衡状态, 受力、位移及节流面积不断变化, 所建立的模型准确与否直接决定了这些量的大小。

3.1 调压装置数学模型

调压装置数学模型主要包括定压活门节流阀及节流孔流量方程、调压腔温度与压力微分方程、定压活门组件及锥形塞运动方程。下面应用气动热力学, 理论力学等建立各个部件数学模型^[12-13]。

3.1.1 节流阀及节流孔流量方程

锥形活门结构示意图如图 3 所示。

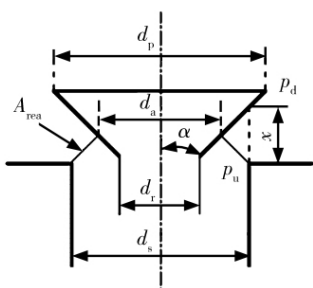


图 3 锥形活门结构示意图

Fig. 3 Schematic of conical poppet valve

图 3 中 A_{rea} 为节流面积; d_p 为阀芯直径; d_r 为阀杆直径; d_s 为阀口直径; x 为阀门开度; p_u 为上游压力; p_d 为下游压力。

由几何关系得, 流通面积 A_{rea} 为

$$A_{rea} = \pi \cdot x \cdot \sin \alpha \cdot (d_s - x \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha) \quad (1)$$

气体通过阀口及节流孔的流动均视为气体等熵通过收缩喷嘴的过程^[14], 得通过节流阀的质量流量为

$$Q_m = A_{rea} \cdot C_q \cdot C_m \cdot \frac{p_u}{\sqrt{T_u}} \quad (2)$$

其中 C_q 为节流系数, C_m 的表达式为

$$C_m = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\kappa}{R_g(\kappa-1)}} \sqrt{\left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_d}{p_u}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} & \left(\frac{p_d}{p_u}\right) > p_{cr} \\ \sqrt{\frac{2\kappa}{R_g(\kappa+1)}} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} & \left(\frac{p_d}{p_u}\right) \leq p_{cr} \end{cases} \quad (3)$$

R_g 为气体常数, κ 为定熵指数, p_{cr} 为临界压强比, 表达式为

$$p_{cr} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (4)$$

节流阀受到上下游压力的作用, 假设节流面的上下游压力变化是突变的, 上游压力为 p_u , 下游压力为 p_d 。节流阀门的上侧受到压力 p_d 的作用, 作用力方向向下。下侧受到压力 p_u 的作用, 作用力方向向上。

节流阀门所受气体作用力合力为

$$f = p_d \frac{\pi}{4} d_a^2 - p_u \frac{\pi}{4} (d_a^2 - d_r^2) \quad (5)$$

通过节流孔的流量方程同为式(2)~式(4), 相应的面积及节流系数则为节流孔的面积和节流系数。

3.1.2 调压腔温度与压力微分方程

调压腔为一个与外界有质量流量交换的开口系, 随着气流进入和流出腔体, 腔体的压力和温度发生着变化。

假定腔体与外界无热量交换, 腔体内温度与压力分布均匀, 热力过程为等熵过程。

等熵过程方程为

$$pv^\kappa = C_1 \quad (6)$$

理想气体状态方程为

$$pv = R_g T \quad (7)$$

式(6)与式(7)两式中 p 为压力, v 为比体积, κ 为定熵指数, R_g 为气体常数, T 为温度。

将(6)式与式(7)联立, 得到用温度和压力表示的等熵过程方程为

$$\frac{T^\kappa}{p^{\kappa-1}} = C_2 \quad (8)$$

对式(8)两边取对数,再对时间求导,整理得温度与压力微分关系式

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{\kappa-1}{\kappa}\right) \cdot \frac{T}{p} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (9)$$

质量为 m (kg) 的理想气体,体积为 V ,其状态方程为

$$pV = mR_g T \quad (10)$$

两边对时间求导,整理得压力微分方程

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R_g T}{V} \frac{dm}{dt} + \frac{mR_g}{V} \frac{dT}{dt} - \frac{p}{V} \frac{dV}{dt} \quad (11)$$

将式(9)代入式(11),整理得

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\kappa R_g T}{V} \frac{dm}{dt} - \frac{\kappa p}{V} \frac{dV}{dt} \quad (12)$$

设进出腔体的质量流量分别为 $q_{m,in}$ 和 $q_{m,out}$, 则有

$$\frac{dm}{dt} = q_{m,in} - q_{m,out} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12),得

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\kappa R_g T}{V} (q_{m,in} - q_{m,out}) - \frac{\kappa p}{V} \frac{dV}{dt} \quad (14)$$

这样,得到腔体内温度和压力的微分方程。

3.1.3 定压活门组件及锥形塞运动方程

在调压装置工作过程中,定压活门柱塞和活门顶杆保持紧密接触,将两者看作一个整体,作受力分析,对应运动微分方程为

$$-m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_p + Kx + B \frac{dx}{dt} + F_0 \quad (15)$$

其中 m 为柱塞和活门质量和; x 为位移; F_p 为所受气体压力合力; K 为弹簧弹性系数; B 为阻尼系数; F_0 为弹簧的预紧力。

式(15)同为锥形塞运动微分方程,各参数为相应锥形塞运动参数。

以上建立了调压装置各部件的数学模型,下面应用 AMESim 对系统进行建模。

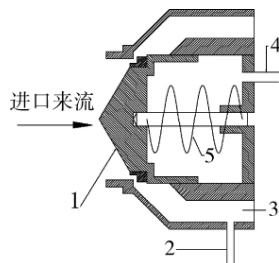
3.2 调压装置 AMESim 模型

应用 AMESim 气动系统建模时,选择工作气体为完全气体模型,根据各部件不同元件的种类、功能和结构,分别选用相应的模块建模,最终根据原理图将各个部件连接,建立整个系统的模型。

3.2.1 主节气门部件 AMESim 模型

主节气门部件系统由弹簧、锥形塞及壳体等组成,为一节流类部件。ATS 进口来流经过锥形塞的减压作用后压力减小,阀门的开度决定了涡

轮导向器前压力的大小。锥形塞受到进气压力、后腔气体压力以及弹簧力的作用,在这三个力的作用下左右移动,锥形塞在移动过程中节流面积不断变化。



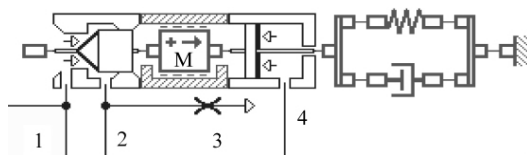
1 锥形塞; 2 通柱底部; 3 通导向器;
4 通调压腔; 5 弹簧

图4 主节气门结构示意图

Fig. 4 Schematic of main throttle system

锥形塞及壳体的节流模型选择为锥形可变节流口模块,锥形塞左右移动位移受边界条件的限制,其运动模型选择为沿直线运动有位移限制的质量块,锥形塞后腔容积可变,腔体固定,锥形塞左右移动,其模型选择为活塞自由移动腔体固定不动的气动活塞部件。

主节气门出口为涡轮导向器, AMESim 库中并没有相应的模块,可将其等效为一节流口元件,节流面积为导向器面积。主节气门仿真结构如图5所示。



1 通起动机进口; 2 通定压活门柱塞;
3 通导向器; 4 通锥形塞后腔

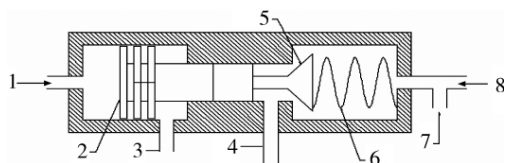
图5 主节气门部件模型

Fig. 5 AMESim submodel of main throttle system

3.2.2 定压活门部件 AMESim 模型

定压活门部件结构如图6所示。定压活门部件由柱塞、活门顶杆、活门、弹簧及节流孔组成。柱塞底端受到导向器前压力作用,顶端受到大气压力作用。活门受到柱塞推力、起动机进口来流压力、调压腔压力及弹簧力的作用。活门在这些力的作用下,节流面积及所受气流压力的作用面积都不断变化。

由于在 AMESim 库中没有柱塞模块,因而根据柱塞结构特点及功能,其模型可选择为双气室单顶杆的气压缸,顶杆位移受边界条件制约。由于定压活门打开后柱塞、活门顶杆及弹簧一起移动,因此参数选择时可以把活门部件总质量集中到柱塞上。

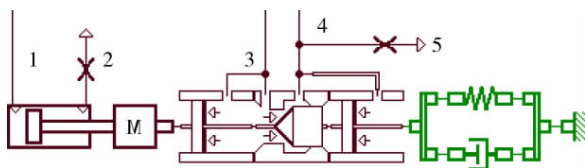


1 通导向器前；2 柱塞；3 通大气；4 通起动机进口；
5 活门阀芯；6 弹簧；7 节流孔通大气；8 通锥形塞后腔

图 6 定压活门部件结构示意图

Fig. 6 Schematic of constant pressure valve system

由于起动机进口来流压力对活门顶杆也有作用力,故在柱塞与阀芯之间加了一个气动活塞模块,起动机进口压力对该活塞块的作用力等于对顶杆的作用力。与主节气门类似,活门模型可选择为锥形节流元件。锥形阀芯顶部同样受调压腔压力的作用,可等效为压力对气缸的作用,气缸顶杆直径为零,截面积等于锥形阀芯顶部面积。节流孔模型直接选择为模型库中的节流孔模块,必须选择好节流孔的面积。定压活门部件仿真结构如图 7 所示。



1 通导向器前；2 通大气；3 通起动机进口；
4 通锥形塞后腔；5 节流孔通大气

图 7 定压活门部件模型

Fig. 7 AMESim submodel of constant pressure valve system

3.2.3 调压装置整体 AMESim 模型

以上分别建立了调压装置工作气体及各部件模型,下面根据系统原理图将各个部件模型进行连接,设置输入压力、温度信号源,建立调压装置的 AMESim 模型如图 8 所示。

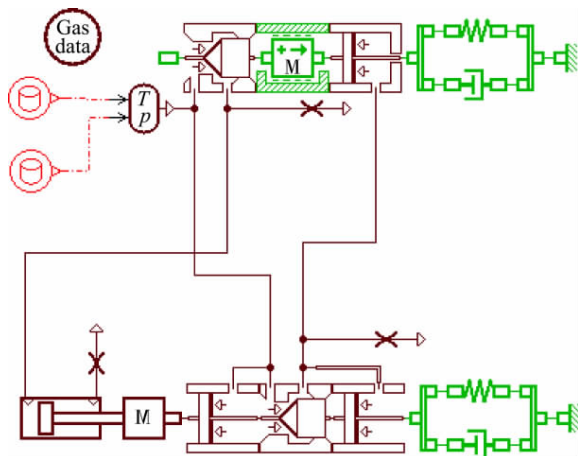


图 8 调压装置仿真模型

Fig. 8 AMESim model of pressure controller

4 系统仿真

对调压装置进行仿真研究,在该压力闭环系统中,输入量为 ATS 进口压力 p_i ,由信号源模块输入;输出量为涡轮导向器前压力 p_t 。

以某型 ATS 为仿真对象,设置仿真时间为 10 s,仿真步长 0.01 s。为验证系统的压力输出特性,分别在斜坡输入、随机数序列信号、单个阶跃信号及正弦信号输入下计算系统的动态响应。

图 9 为斜坡输入下的压力特性。输入压力从初始值线性增加到最大压力,为了获得定压活门未打开时输入压力与输出压力的关系,将输入压力下限适当降低,可以看到活门未打开时,输出压力随着输入压力增大而增大,与输入压力近似为定比例关系;当活门打开后,输出压力基本保持不变,但仍然随输入压力增加而缓慢增加,压力范围在 0.336~0.351 MPa。这是由于实际锥形塞及定

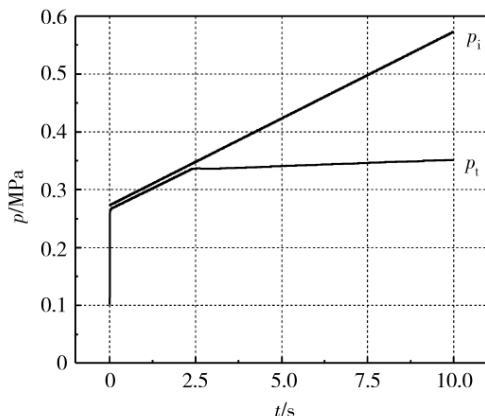


图 9 斜坡输入下的输出压力

Fig. 9 Output pressure under ramp signal

压活门部件在运动中受到阻尼力和摩擦力作用,且摩擦因数随着速度的变化而变化引起的。

图 10 为随机数(方波)序列信号输入下的压力响应特性,验证系统在输入压力不断阶跃变化下的输出压力变化。输入最大压力为 0.530 MPa 时,经过 0.83 s 的调节时间,输出压力稳定在 0.350 MPa;最小压力为 0.406 MPa 时,经过 0.29 s 的调节时间,压力稳定在 0.339 MPa;不同输入下的输出压力在 0.339~0.350 MPa 之间,且阶跃信号越大,超调量越大,相应的调节时间也越长。输入压力不变时,系统处于稳态,输出压力不随输入压力变化,从理论分析,上述情况符合实际装置工作机理。

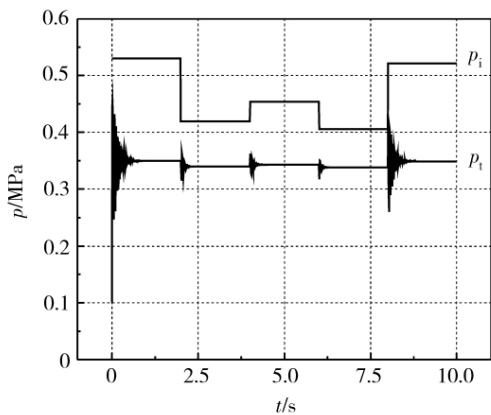


图 10 随机信号输入下的输出压力
Fig. 10 Output pressure under a random number sequence signal

为查看系统的最大调节时间及超调量,将阶跃输入压力设为最大值 0.57 MPa,得到的输出压力如图 11 所示,输出压力波动过程中的最大压力为 0.481 MPa,此后波动不断衰减,经过 1.2 s 后,压力稳定在 0.351 MPa,调节时间为 1.2 s,超调量为 37%。

图 12 为输入压力为正弦波动下的压力特性,压力输入幅值在 0.38~0.55 MPa 间波动,输出压力始终在 0.337~0.349 MPa 之间。

综合图 9~图 12 仿真结果可以看出:调压装置未工作时,进口压力曲线与涡轮导向器前压力曲线平行,压力损失系数几乎为一定值,直到进口压力增大到一定值后,定压活门打开,涡轮导向器前压力稳定在给定范围。

典型工作点试验值与仿真结果如表 1,通过数据对比,结合多种特征输入信号下的仿真结果可以看出,所建立的 ATS 调压装置模型能反映调

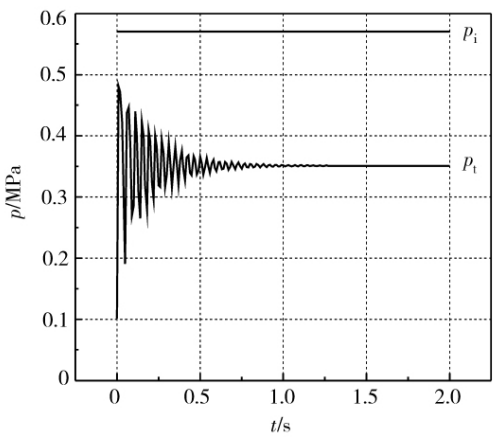


图 11 最大输入下的输出压力
Fig. 11 Output pressure under the maximum input pressure

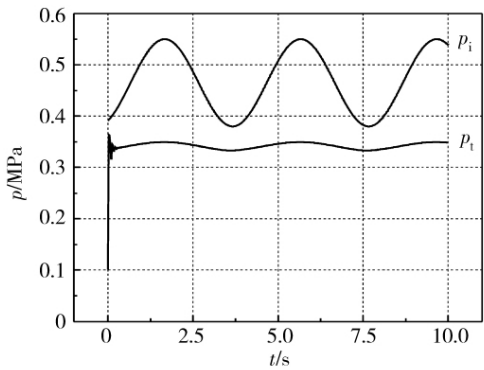


图 12 正弦信号下的输出压力
Fig. 12 Output pressure under an sine signal

压装置的实际工作情况,仿真结果与试验数据吻合,在 ATS 进口压力工作范围内仿真误差小于 3%。

表 1 典型工作点仿真数据与试验数据对比
Table 1 Comparison of typical operation point between simulation and test results

进气压力 p_i /MPa	试验数据 p_t /MPa	仿真数据 p_t /MPa	误差/ %
0.3457	0.3286	0.3364	0.024
0.3497	0.3282	0.3388	0.032
0.3517	0.3307	0.3392	0.026
0.3538	0.3306	0.3393	0.025
0.3563	0.3311	0.3391	0.02

5 结 论

本文应用 AMESim 软件通过模块化建模方

法,建立了空气涡轮起动机(ATS)调压装置的仿真模型.针对某型 ATS 的调压装置,对不同输入下的输出压力进行了仿真.结果表明输出压力均满足工作参数的要求,证明了对调压装置建模的正确性,为空气涡轮起动机及发动机起动系统性能计算奠定了基础.

另外,从仿真结果可以清楚地看出调压装置在起动机工作时所起的作用,它极大地减弱了起动机进口压力变化对涡轮的影响,使导向器前压力保持在可以接受的范围内,使发动机起动更加平稳可靠的同时,也降低了起动机对气源的要求.

参考文献:

- [1] Farnsworth G A, Plevich C C, Durnal K. Design improvements in air turbine start systems[R]. Anaheim, CA, USA; SAE Technical Paper 921947, 1992.
- [2] Morita M, Sasaki M. Restart characteristics of turbofan engines[R]. ISABE 89-7127, 1989.
- [3] Giesler W, Mathis D, Hage J R. High reliability oil-air high speed gear box clearance seal[R]. AIAA 98-3287, 1998.
- [4] Chappell M A, McLaughlin P W. An approach to modeling continuous turbine engine operation from startup to shutdown[R]. AIAA 91-2373, 1991.
- [5] 常博博, 苏三买, 刘美凤, 等. 辅助动力装置建模及数值仿真[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 2122-2127.
CHANG Bobo, SU Sanmai, LIU Meifeng, et al. Model and numerical simulation of auxiliary power unit[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2122-2127. (in Chinese)
- [6] 苏三买, 常博博, 刘铁庚, 等. 辅助动力装置喘振控制方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 2095-2100.
SU Sanmai, CHANG Bobo, LIU Tiegeng. The research on control method of surge in auxiliary power unit[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2095-2100. (in Chinese)
- [7] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册第 14 册: 辅助动力装置及起动机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [8] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第 13 册: 动力装置系统设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
- [9] 付永领, 祁晓野. AMESim 系统建模和仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [10] 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 aero-engine using AMESim[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(4): 572-576. (in Chinese)
- [11] 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[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)
- [12] 王新月. 气体动力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [13] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学[M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [14] 曹玉平, 阎祥安. 气压传动与控制[M]. 天津: 天津大学出版社, 2010.