

涡喷发动机起动过程建模及时序仿真

王磊¹, 杨丽英², 张宏达^{2,3}, 何玉庆²

(1.91550 部队 93 分队, 辽宁 大连 116021; 2.中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 涡喷发动机起动过程涉及所有执行结构的协作, 因此对控制系统提出了更高的要求。如何对发动机起动过程建模, 准确地分析各执行机构状态对其性能的影响, 对控制系统设计有重要意义。根据某型涡喷发动机起动过程工作原理, 采用部件法构建了转子转速数学模型, 结合地面试车数据和执行机构电压数据辨识模型参数, 通过时序仿真验证了涡喷发动机的起动过程。仿真结果表明, 建立的发动机模型能真实地反映各执行机构的状态与发动机的性能, 对发动机控制系统的设计具有指导意义。

关键词: 涡喷发动机; 起动过程; 模型; 时序仿真

中图分类号: V233.6+3

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 01-0074-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0057

Modeling and Timing Simulation of Turbojet Engine Starting Process

Wang Lei¹, Yang Liying², Zhang Hongda^{2,3}, He Yuqing²

(1. Troop 91550 Unit No.93, Dalian 116021, China; 2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The turbojet engine is complicated in its starting process and requires collaboration and cooperation involving all the execution structures, thus higher demand is put forward for the control system. How to model the engine starting process, and then accurately describe and analyze the impact of actuator states on engine performance directly affect the engine control system performance. According to the working principle of the JetCat-P400 German turbojet starting process, the rotor speed mathematical model of the turbojet engine starting process is constructed by the component method. The parameters of the model are identified by combining the experimental data of the engine ground test and the voltage data of the actuator. Finally, the start-up process of the turbojet is verified by the time series simulation. The simulation results show that the established engine model can truly reflect the state and the performance of the engine, which is instructive for the engine control system design.

Keywords: turbine engine; starting process; modeling; timing simulation

引言

无人机是一种使用无线电控制设备和自备控

制程序的自主飞行机器人。应用领域包括军用和民用, 在民用方面, 主要应用于电力巡检、航模、航拍、测绘、植保等领域; 在军用方面, 主要应用于军事侦察、情报收集、对地精确作战、反恐作战等领域。涡喷发动机具有构造简单、推重比高、造价低廉等优点, 使其成为无人机非常理想的一种推进设备。近年来, 随着科技的不断进步, 尤其是材料



收稿日期: 2017-01-16 修回日期: 2017-06-30;
基金项目: 国家自然科学基金(61503369), 国家自然科学基金重大研究计划(91748130);
作者简介: 王磊(1972-), 男, 辽宁抚顺, 博士, 高工, 研究方向为无人机控制; 杨丽英(1979-), 女, 山西, 博士, 副研究员, 研究方向为无人机自主控制。

http: www.china-simulation.com

加工技术、微型电子系统和传感器技术的不断突破,为微型涡喷发动机的研制提供了强大的技术基础。因此,越来越多的研究机构投入到涡喷发动机的研制中。涡喷发动机起动过程不是简单的供油和点火,其涉及到执行机构的协同合作,必须准确把握时间顺序,否则起动失败,而且发动机运行时环境比较复杂,使得发动机在控制方面要求很高。通常,涡喷发动机控制量为燃油流量,燃油流量供油过多,容易使发动机产生超温现象。由于发动机本身在材料的极限温度附近工作,一旦发生超温,则会严重损坏发动机。对发动机的准确控制是发动机稳定运行的前提,而发动机控制方面的研究又离不开对发动机起动过程进行建模。

涡喷发动机是一个非常复杂的非线性、热力、气动系统^[1],其起动过程的性能直接影响到发动机的安全稳定及发动机的寿命。由于发动机在低转速下难以获取部件特性,尤其是燃烧室特性和压气机、涡轮特性,使得发动机起动过程的数学模型难以建立。文献[2-6]提出采用部件特性法对起动过程进行建模,但由于难以获取发动机部件特性,使得建模难度大,且仿真时间长,理论复杂。文献[7-8]提出采用简单三段积分法对起动过程进行建模,将起动过程划分为起动电机单独工作、起动电机和燃油同时工作以及燃油单独工作三个阶段,该方法在工程中被广泛使用。文献[9-10]提出采用 RBF 神经网络对发动机起动过程进行辨识建模,其缺点是物理意义不够明确。而在对起动过程性能优化时,上述 3 种模型都不能有效地分析执行机构状态变化对性能的影响。

1 涡喷发动机地面试车试验及起动过程分析

涡喷发动机起动过程涉及到起动电机、点火器、油泵、主油阀和起动油阀 5 个执行机构的协同工作。起动过程是按照时序对执行机构进行控制的一个过程,所以获取执行机构的时序是启动过程建模及分析的基础。本文首先对发动机进行地面试车

试验,获取试验数据,然后结合试验数据获取各阶段执行机构状态,最后通过执行机构状态对对起动过程时序进行详细分析。

1.1 涡喷发动机地面试车试验平台

本文采用德国 JetCat-P400 型涡喷发动机系统作为试验对象,并且搭建了涡喷发动机地面试车试验平台,如图 1 所示。整套系统由两部分组成:第一部分为德国 JetCat-P400 型涡喷发动机套装,其中包含微型涡喷发动机、地面支持单元、控制单元、燃油泵、电池等;第二部分为自行设计的电压监测系统,该电压监测系统基于 STM32 板卡进行设计,实现对起动电机、点火器、主油阀和起动油阀 4 个执行机构的电压进行监测和记录。

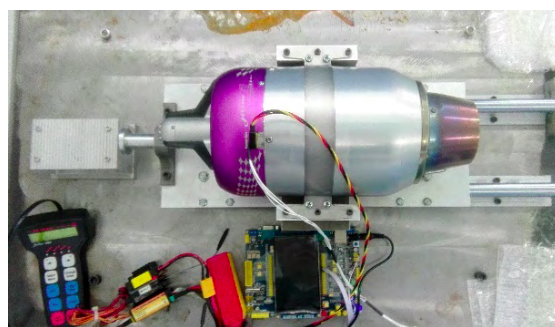


图 1 涡喷发动机地面试车试验平台
Fig. 1 Platform for ground test of turbojet engine

1.2 微型涡喷发动机地面试车试验

本试验旨在获取涡喷发动机转速数据和各执行机构电压数据,其中试验数据来源两处:第一是来自于涡喷发动机控制单元,如图 2 所示,虚线代表发动机转子转速期望值,实线代表发动机转子转速实际测量值。图 2 中共有 6 次试车数据,时间轴 [0, 150] 是稳定运行的数据, [150, 210] 和 [350, 400] 是起动失败数据,其余数据为起动成功数据,这些转速实验数据将用于验证第 3 节仿真实验中模型的准确性;第二是来自于电压监测系统,如图 3 所示,图 3 是试验获取的各执行机构电压数据,主要对起动电机、点火器、主油阀和起动油阀进行监控。分析图 3 可知,当 $t > 30$ s 时,涡喷发动机开

始启动过程；当启动电机两端电压为 0 V 时，启动电机为关，当两端电压大于 1 V 时，启动电机为开，点火器与启动电机相同；而主油阀与启动油阀与之相反，当两端电压为 0 V 时，油阀为开。

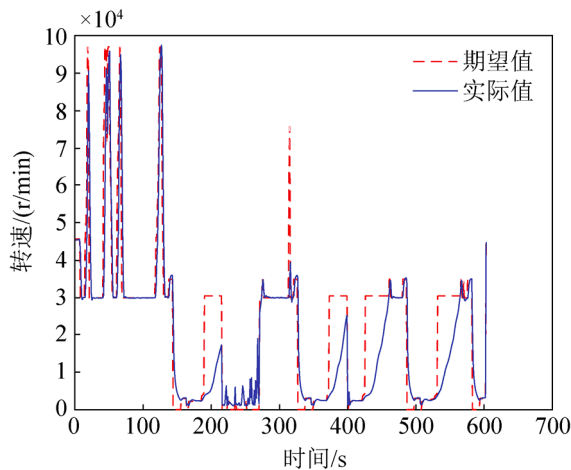


图 2 涡喷发动机转子转速试验数据
Fig. 2 Rotor speed test data of turbojet engine

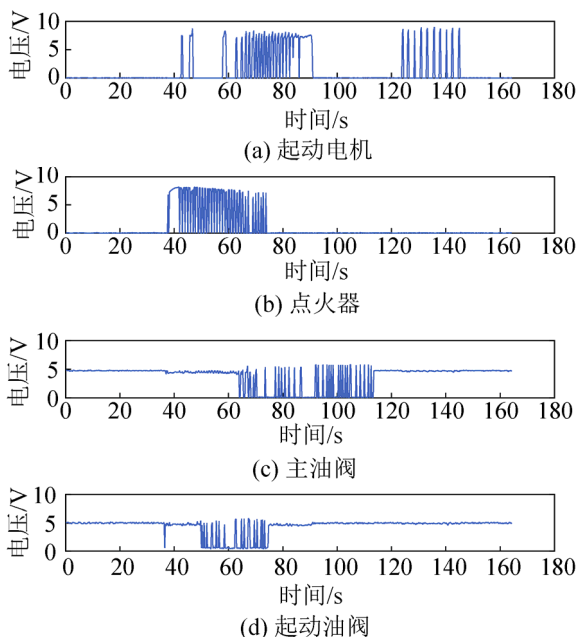


图 3 各执行机构电压试验数据
Fig. 3 Voltage test data of each actuator

1.3 涡喷发动机启动过程时序分析

涡喷发动机从零转速加速到慢车转速的过程，称为发动机启动过程^[11-12]。涡喷发动机启动过程必须严格按照时序进行启动，其执行机构在不同的阶

段具有不同的状态，从图 3 可以获取各阶段执行机构的工作状态。涡喷发动机启动过程时序为：启动电机最早开始工作，将发动机转子带动到指定转速，然后点火器开始工作，对发动机进行预热，打开燃油阀，通过油泵对发动机供油，当燃油进入发动机之后被点火器点火，然后通过改变油泵两端电压使发动机的转速平稳上升，当发动机转速到达指定转速之后关闭启动电机，启动过程完成。启动过程关键是要确定何时开启各个执行机构，何时关闭，大小是多少。详细发动机启动过程如下：

1) 启动信号发出：将遥控器辅助杆拨到开始状态，并将油门微调从最低推至最高，此时信号灯开始逐次点亮，在几秒时间内将油门杆从最低推至最高，启动信号发出。设计如此复杂的启动时序是为了保护发动机不被错误的启动；

2) 启动电机工作：启动电机上电 1 s 后关闭。此时启动电机工作主要是为了将燃烧室里的燃油吹出燃烧室。因为在下一阶段，启动电机不工作，而点火器工作，如果此时燃油比达到点火要求，很有可能烧损发动机而转子不会转动起来；

3) 预热阶段 1：此时只有点火器工作，其他执行机构都停止工作。所以在此阶段，发动机转子转速在摩擦力及空气阻力作用下降低，尾气温度在点火器作用下慢慢上升；

4) 预热阶段 2：开启启动电机和油泵。只有达到一定的转速后，燃烧室内的气流才能建立起稳定燃烧所需要的气流压力和温度，所以此时设定启动电机的转速期望值为 2 200 r/min，通过改变启动电机两端的电压来控制电机的转速达到期望值。然后开启油泵，由于此时油阀并没有开启，所以只是给油阀前的油路供油；

5) 点火阶段：开启启动油阀，主油阀暂时关闭。需要注意的是德国 JetCat-P400 型涡喷发动机是单燃油发动机，采取的策略是单油泵双油路的供油方式。此时燃油进入燃烧室后，速度和温度都不会发生很大的变化，只是对燃烧室及整个发动机进行加热，为点燃主油路燃油做准备工作；

6) 主油阀打开: 开启主油阀, 同时加大油泵电压和起动机电电压。燃油经油泵向两条油路供油, 从上图 3(d)可以看出, 此时起动油阀的占空比逐渐减小, 这是一个缓冲的过程, 避免发动机突然加油而引起起动失败;

7) 延时阶段: 继续加大油泵电压和起动机电电压。此阶段是等待主油路点火成功。在这个阶段, 温度会快速上升, 转速缓慢上升。待温度上升到 400 后认为点火成功, 进入下一阶段;

8) 主油路阶段: 关闭起动油阀和点火器。从现在开始所有燃油都注入主油路, 燃烧室的温度已经能够点燃燃油, 不需要点火器;

9) 加速阶段: 继续加大油泵电压和起动机电电压。在这一阶段, 转速快速上升, 而温度保持在四五百摄氏度, 待转速达到 30 000 r/min, 进入下一阶段, 需要注意的是, 这个阶段一般是容易出问题的阶段, 因为在供油的时候, 供油过多会引起富油现象, 尾喷管喷火; 而供油过少会引起贫油熄火现象;

10) 起动电机脱离阶段: 关闭起动电机。如图 3(a)所示, 电机两端电压为零代表起动电机关闭。在这一阶段, 转速已经达到理想期望转速, 继续加大油泵电压, 转子转速继续上升, 起动电机自动脱离;

11) 遥控器控制阶段: 此时转速重新稳定在 30 000 r/min, 如图 2 所示。当油门杆从最高拨至最低位置时, 进入遥控器控制阶段, 此时发动机为慢车状态。

2 微型涡喷发动机起动过程模型建立

涡喷发动机在零转速条件下起动时必须依靠外界动力源, 因为在转速为零的情况下点火只能将发动机烧损而不能使其加速。在一定转速和温度之后通入燃油点火, 燃烧室产生的高温、高压燃气对涡轮做功, 使得发动机转子的转速提高。而由于转速的提高, 涡轮本身的阻力也不断的提高。所以在发动机起动过程中, 起动电机和燃烧室产生的燃气

对发动机转子做功, 产生正向加速度, 而涡轮本身的阻力阻碍发动机转子加速, 产生反向加速度, 则可得涡喷发动机转子加速度为:

$$a = a_q + a_T - a_C \tag{1}$$

式中: a_q 为起动电机产生的加速度, 当断电之后其值为 0; a_T 为燃油产生的加速度, 当燃油阀门关闭之后其值为 0; a_C 为发动机自身产生的反向加速度。

从而得到涡喷发动机转子转速模型:

$$n = n_0 + \int_0^t a dt \tag{2}$$

式中: n_0 为起始转速, 在地面试车情况下一般为 0, 在空中其值不定。

2.1 发动机自身反向加速度 a_C

发动机在地面试车实验结束之后, 由于起动电机断电、燃油油泵断电及燃油阀关闭, 使得发动机转子的加速度只有发动机自身产生的摩擦及空气阻力。所以可以利用发动机停车过程中的数据来辨识出 a_C 。在发动机高速运转的情况下, 其主要的阻力来自于空气阻力, 忽略起动过程中传动附件和克服摩擦所需的阻力, 并将带动发动机转子需要的加速度考虑为与转速的平方成正比^[13], 即:

$$a_C = C \times n^2 \tag{3}$$

式中: C 为常数, 它和发动机的类型有关。

涡喷发动机地面试车实验后自动停车获取的实验数据, 由于起动电机和燃油都不对其做功, 使得转速不断下降。对转速进行求导, 可以获取其加速度。最后可以求出常数: $C = 2.6921 \times 10^{-5}$ 。

2.2 起动电机产生的加速度 a_q

德国 JetCat-P400 型涡喷发动机采用的起动电机是一个直流电机。直流电机有一个很小的电枢电阻, 当给直流电机通电后, 其起始电流很大, 使得电机开始旋转而产生反向电动势, 所以电流开始减小, 电机提供的力矩开始减小, 相应的加速度也减小, 最后达到稳定的转速。直流电机常用方程^[14-16]:

$$T_m \frac{dw_m(t)}{dt} + w_m(t) = K_m u_a(t) - K_c M_c(t) \tag{4}$$

式中： $w_m(t)$ 是电机转速，且 $w_m(t) = n$ ； T_m 是电动机机电时间常数； K_m 是常数，和电机类型有关； $u_a(t)$ 是电机电压； $K_c M_c(t)$ 是电机负载转矩。

负载转矩提供的加速度：

$$\frac{K_c}{T_m} M_c(t) = C \times n^2 \quad (5)$$

电机两端电压：

$$u_a(t) = U \times \text{pwm_motor} \quad (6)$$

式中： $U=9.9$ V，为电机驱动板电压；pwm_motor 是控制电机信号的占空比，在 0 到 1 之间变化。

将式(5)和(6)代入式(4)中可得：

$$\frac{dn}{dt} = \frac{K_m}{T_m} \times U \times \text{pwm_motor} - \frac{n}{T_m} - C \times n^2 \quad (7)$$

则电机提供的加速度：

$$a_q = \frac{K_m}{T_m} \times U \times \text{pwm_motor} - \frac{n}{T_m} \quad (8)$$

为了获取起动电机的参数，设计了地面冷转停车实验。在转速为零的情况下，pwm 信号占空比为 10%，其转速不断上升，然后记录数据。对转速进行求导，求出 dn/dt ，然后计算出其相关系数。

最后解得： $\frac{K_m}{T_m} \times U = 8130$ ； $\frac{1}{T_m} = 0.05$ 。

2.3 燃油产生的加速度 a_T

将涡轮提供的加速度简单的考虑为与转速成线性关系^[10,17]，即：

$$a_T = \frac{C \times n_r^2}{(n_r - n_1)} \times (n - n_1) \quad (9)$$

式中： n_1 为点火前转速； n_r 为当前供油量条件下涡轮与压气机的功率平衡转速。

涡喷发动机点火之后，不同的供油条件下，涡喷发动机的稳定转速都不相同，对实验数据进行分析，很容易发现涡喷发动机转子稳定转速与油泵电压成线性关系，即：

$$n_r = k \times U_{\text{pump}} \quad (10)$$

式中： k 为常数； U_{pump} 为油泵两端电压。

通过对 JetCat-P400 型涡喷发动机进行地面试

车试验，提取油泵两端电压对应的稳定转速值，在电压一定情况下，对所有转速进行平均值滤波。最后得到图 4 对应的涡喷发动机转子转速与油泵电压的关系。利用 Matlab 对数据进行拟合，求出： $k = 2.708 \times 10^4$ 。

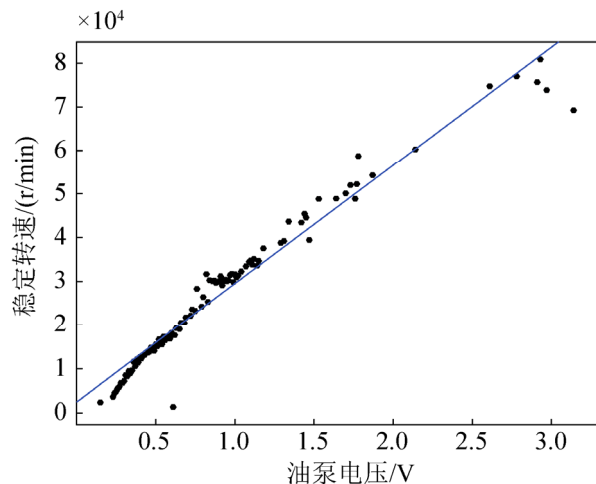


图 4 涡喷发动机稳定转速与油泵电压的关系
Fig. 4 Relationship between steady speed and fuel pump voltage of turbojet engine

3 微型涡喷发动机起动过程时序仿真

涡喷发动机起动过程必须严格按照时序进行。从上述起动过程可以看出，起动过程并不是简单地给起动电机供电，油泵供电。而是按时间顺序将其分为多个阶段，在每个阶段执行机构动作都不一定相同，即使是同一阶段，不同时间点对应的起动电机和油泵电压也不一定相同。所以对涡喷发动机起动过程仿真须将时间考虑进来。本文采用 Matlab/Stateflow 来实现涡喷发动机起动过程仿真，利用 Stateflow 可以实现有限状态机的逻辑转换和事件驱动，采用这种图形化的工具进行有限状态机的设计，可以提高设计和调试的效率，非常适合设计具有复杂逻辑和严格时序规律的状态机。图 5 是涡喷发动机启动流程图。流程图的主要思想是写入一个控制当中，然后根据输入值输出执行机构的控制参数，然后将这些控制参数代入带上面的数学模型当中，从而完成模型的仿真。

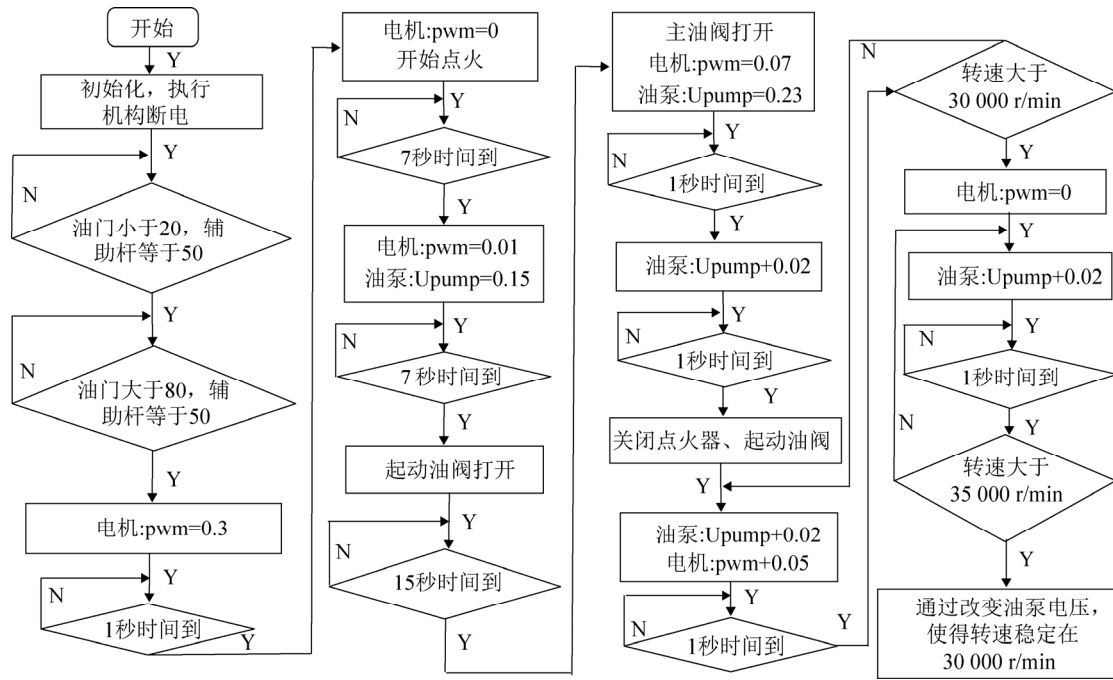


图 5 涡喷发动机启动过程流程图
Fig. 5 Flow chart of turbojet engine starting process

在图 5 中, 当仿真开始后, 系统在等待起动信号, 油门杆从最低到最高。起动信号发出之后, 开始对起动电机供电, 约 1 s 后断电, 利用发动机模型可以求出此时转子转速; 7 s 后进入下一个状态, 在这一阶段可求出发动机对应转子转速。依此类推, 可以按时序将涡喷发动机转子转速依次求出。其仿真曲线如图 6 所示。

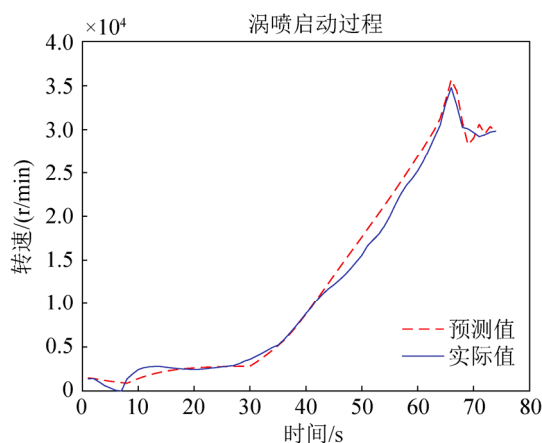


图 6 启动过程仿真
Fig. 6 Simulation of starting process

在图 6 中, 实线为发动机地面试车实验所获得的真实数据, 虚线为利用上述模型进行仿真得到的

仿真数据。从图中可以看出, 仿真得到的发动机转子转速与试验获得的数据一致。在没有点火之前发动机的转速是由起动电机和自身阻尼共同作用, 所以发动机的转速很低。当点火之后, 发动机的转速急速上升, 而且在点火之后燃油提供的加速度模型和实际模型相近, 其走向完全一致, 此为按照时序建模的优势。

4 结论

基于德国 JetCat-P400 型涡喷发动机进行发动机启动过程建模及分析: 首先对发动机启动过程时序进行分析; 然后研究启动过程中涡喷发动机转子的力学特性, 建立了涡喷发动机启动过程数学模型, 并且利用实验数据对参数进行了辨识; 最后针对涡喷发动机启动过程进行时序仿真。基于此仿真方法得到的仿真数据和实验数据一致, 验证了本文方法的有效性, 对涡喷发动机启动过程建模、时序仿真方法以及启动过程控制系统研发具有指导意义。

参考文献:

[1] 张毅君, 董一群, 詹光, 等. 无人机无动力返场航迹规划与控制仿真[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(1): 220-225, 234.

- Zhang Yijun, Dong Yiqun, Zhan Guang, et al. Path Planning and Control Simulation of Unpowered Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Returning to The Airport[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(1): 220-225, 234.
- [2] 时瑞军, 周剑波, 张秋贵, 等. 单轴涡喷发动机起动过程数学建模研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2010, 23(3): 1-4.
Shi Ruijun, Zhou Jianbo, Hang Qiugui, et al. Analysis on the Modeling Method of Single Spool Turbojet Engine Startup Process[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2010, 23(3): 1-4.
- [3] 陈玉春, 王朝蓬, 黄兴鲁, 等. 功率提取法在涡喷发动机起动特性模拟及控制规律设计中的应用[J]. 航空动力学报, 2010, 25(6): 1277-1283.
Chen Yuchun, Wang Zhaopeng, Huang Xinglu, et al. Application of Power Extraction Method in Starting Process Simulation and Control Law Design of Turbojet Engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6): 1277-1283.
- [4] 郑绪生. 某型涡轴发动机起动建模技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
Zheng Xusheng. The Research on Starting Process Modeling of a Turbine Engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [5] Agrawal R K, Yunis M. A Generalized Mathematical Model to Estimate Gas Turbine Starting Characteristics[J]. Journal of Engineering for Power (S0022-0825), 1982: 104(1): 194-201.
- [6] Kim J H, Song T W, Kim T S. Dynamic simulation of full startup procedure of heavy-duty gas turbines[J]. ASME. J. Eng. Gas Turbines Power (S0742-4795), 2002, 124(3): 510-516.
- [7] 吴虎, 冯维林. 某型涡扇发动机起动过程数值模拟[J]. 航空动力学报, 2007, 22(12): 2068-2072.
Wu Hu, Feng Weilin. Numerical Simulation of the Start-Up Process of Augmented Turbofan Engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(12): 2068-2072.
- [8] 傅强. 某型涡轴发动机起动过程建模及仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(12): 57-60, 73.
Fu Qiang. Modeling and Simulation of Starting Process of X Type Turbo Shaft Engine[J]. Computer Simulation, 2013, 30(12): 57-60, 73.
- [9] 姜涛, 李应红. 基于动态 RBF 网络的发动机起动过程模型辨识[J]. 航空动力学报, 2002, 17(3): 381-384.
Jiang Tao, Li Yinghong. A Dynamic Identification Model of Aeroengine Starting Process Based on the RBF Network[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(3): 381-384.
- [10] 巫庆辉, 申庆欢, 王新君. 基于 RBF 神经网络的离心式水泵模型研究[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(4): 800-805, 814.
Wu Qinghui, Shen Qinghuan, Wang Xinjun. Research on Modeling of Pump Model Based on RBF Neural Network[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(4): 800-805, 814.
- [11] 杨帆, 樊丁, 彭凯, 等. 基于试车数据的航空发动机起动过程建模[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(6): 1-4.
Yang Fan, Fan Ding, Peng Kai, et al. Modeling of an Aero-Engine in Starting Process Based on the Test Data [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2013, 14(6): 1-4.
- [12] M Badami, P Nuccio, A Signoretto. Experimental and numerical analysis of a small-scale turbojet engine [J]. Energy Conversion and Management (S0196-8904), 2013, 76(6): 225-233.
- [13] Shufeng Ye, Jian Wang, Guigang Zhang, et al. Simulation and fault diagnosis for aviation engine starting system based on SIMULINK[C]. Chinese Automation Congress (CAC), 2015, Wuhan, 2015: 1834-1839.
- [14] 孔祥兴, 王曦, 张绍基, 等. 民用涡扇发动机起动过程改进的分段组合控制计划研究与试验[J]. 航空动力学报, 2014, 19(12): 2924-2929.
Kong Xiangxing, Wang Xi, Zhang Shaoji, et al. Research and Experiment on Improved Sectional Combination Control Scheme for Civil Turbofan Engine's Startup Process[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 19(12): 2924-2929.
- [15] Michal Dub, Josef Bajer, Marcel Stepanek. Electronic starting control unit for small jet engine[C]. International Conference on Military Technologies (ICMT), 2015, Brno, 2015: 1-4.
- [16] 刘建勋, 李应红, 张东方, 等. 航空发动机起动过程数值仿真的研究进展[C]// 中国航空学会第六届动力年会论文集(上). 南京: 中国航空学会, 2006: 162-166.
Li Jianxun, Li Yinghong, Zhang Dongfang, et al. Research Progress in Numerical Simulation of Aeroengine Starting process[C]// Proceedings of the Sixth Annual Meeting of the Chinese Society of Aeronautics. Nanjing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2006: 162-166.
- [17] 刘双, 完颜笑如, 庄达民. 飞机燃油系统仿真及有效能分析[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(2): 418-424.
Liu Shuang, Wanyan Xiaoru, Zhuang Damin. Simulation and Exergy Analysis of Aircraft Fuel System[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2): 418-424.