

基于试验的微型涡喷发动机 起动控制研究



彭鸿博,杨创,于军力,冯远

中国民航大学,天津 300300

摘要:通过对微型涡喷发动机试验台的搭建,实现了对其运行时重要参数的测量。为了稳定、准确地实现对燃油流量的控制,以解决起动控制过程中的超温问题,采用步进电机带动齿轮泵的方法去供油,通过控制转速间接控制流量,从而实现了流量准、响应迅速的开环燃油流量控制。通过对对象发动机进行大量的起动特性摸底试验,结合试验数据对控制时序优化,最终整合得出某型微型涡喷发动机地面起动控制时序。通过采用此方法供油,严格按照控制时序进行起动控制试验,结果表明,在保证发动机能够迅速可靠地完成起动过程的前提下,燃烧室出口、涡轮后及尾喷管出口的最高温度明显降低;燃烧室出口温度、涡轮后温度及尾喷管出口温度上升更快,到达峰值时间提前,且峰值更小。这种方法不仅解决了起动超温问题,还可以缩短发动机的起动时间。通过试验对起动控制时序的研究,为微型涡喷发动机的起动控制建立了有效的研究方法,对该型发动机的控制具有重要的工程应用价值。

关键词:微型涡喷发动机;试验台;起动超温;燃油控制;试验技术

中图分类号:V233.6

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.07.003

微型涡喷发动机(MTE)是目前能源系统以及推进动力研究的新兴领域,这种发动机具有推重比高、耗油率低、体积小、重量(质量)轻、能量密度高等一系列优点^[1-4]。主要应用于微小型飞行器的推进动力装置、辅助动力单元及分布式能源系统的发电装置等^[5-7]。国内对MTE的研究起步比较晚,随着近几年来国家对航空领域的高度重视,许多高校先后开展了相关研究工作。对于航空发动机的理论研究往往需要借助于航空发动机试验平台来进行验证^[8-10]。在国内微型涡喷发动机技术尚处于初步发展阶段,且整机试验方面的研究也正处于初步开发阶段,整机试验对MTE的研究来说具有相当重要的地位,对如何测量其参数的研究也同样具有重要意义^[11-14]。因此搭建一套完整的微型涡喷发动机试验台是对其进行研究不可或缺的。

微型涡喷发动机控制主要可以分为起动、加减速及停车三部分,其中起动过程是发动机的一种过渡态工作阶段,更是发动机控制中最重要的部分。起动过程中常会遇到起动超温问题,起动超温危害性极大,严重影响发动机的性能

与寿命^[15]。秦海勤^[16-17]等通过对某型发动机起动过程工作原理分析,对不同类型的起动超温机理、故障发生时机、故障特征,以及可能原因进行了研究,并给出了起动超温故障的预防措施。佟永军^[18]等对航空发动机起动过程进行了深入研究,详细分析了起动超温故障原因,通过建立故障树,最终将起动超温故障的排除落实到了起动供油量的调整上。曾可卉^[19]等针对某型燃气轮机在起动过程发生的一次超温故障,采用故障模式及影响分析与起动过程数据分析相结合的方法,实现了对故障原因的排查,提出了故障整改措施,并验证了措施的有效性。为了提高发动机的使用安全性与可靠性,实现对其起动过程的控制,有必要进一步开展发动机起动过程中超温故障及解决措施的研究。

本文以某型微型涡喷发动机为研究对象,针对实际研发需求,搭建用于测量微型涡喷发动机关键参数的试验台。采用步进电机带动齿轮泵去供油的方法,通过精确控制转速间接控制流量,得到一种流量准、响应迅速的开环燃油流量控制方法,从而通过获取实测数据,可整合优化得出发动

收稿日期: 2021-01-09; 退修日期: 2021-02-18; 录用日期: 2021-04-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费(3122016C0)

引用格式: Peng Hongbo, Yang Chuang, Yu Junli, et al. Research on starting control of micro turbojet engine based on experiment[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(07): 21-26. 彭鸿博, 杨创, 于军力, 等. 基于试验的微型涡喷发动机起动控制研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(07): 21-26.

机起动控制时序,按照控制时序进行起动控制试验,以达到解决某型微型涡喷发动机的起动超温问题的目的。

1 微型涡喷发动机试验台

本文搭建的某型微型涡喷发动机试验台如图1所示,主要分为硬件和软件两部分。硬件部分主要由微型涡喷发动机、台架、油路系统、控制器以及测控系统组成,其中油路系统采用步进电机带动一个齿轮泵去供油,通过控制转速去控制流量,实现了对燃油流量的精确控制等功能,试验台结构如图2所示。



图1 试验台实物图

Fig. 1 Physical picture of the experimental bench

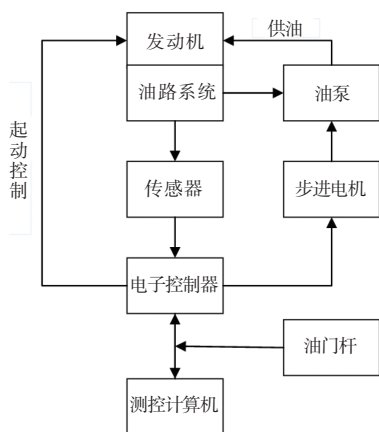


图2 试验台结构图

Fig.2 Structure diagram of the experimental bench

软件部分主要是计算机控制及数据采集系统,主要实现了对不同参数的采集与处理、起动点火控制、加减速控制等功能。该试验测试台采用试验—编程—再试验的研究方法,首先是控制摸索阶段,利用手动油门杆的控制,初步获得发动机起动以及加减速时的供油规律,通过试验数据对比,找到契合控制规律的最优试验数据,再由LabVIEW编写测控程序,实现对微型涡喷发动机的起动控制,最后根据

LabVIEW的结果编写单片机程序,实现了计算机与油门杆对微型涡喷发动机的双控制。

1.1 燃油流量控制

在对微型涡喷发动机控制过程中,燃油计量的准确性和快速性直接影响发动机运行过程的品质^[4-5]。由于微型涡喷发动机的空气流量小,因而对燃油流量更敏感,供油控制就须稳定、准确。一般情况下,微型涡喷发动机配备的都是电动燃油泵(齿轮泵),其通过电压控制燃油流量,但是电机带动下的齿轮泵,其流量不仅与转速有关,还和泵的出口压力有关。由于燃油进入燃烧室后,燃烧室的压力会随发动机状态改变而改变,导致泵出口压力发生变化,这样就会影响其流量。因此燃油流量不仅与控制泵的电压有关,还和出口压力有关,所以在发动机试车中无法直接通过控制油泵电压来确定具体的流量。

由于微型涡喷发动机流量较小,且响应速度快的流量计不易寻且成本高,在测试发动机的过程中,油量的多少又是不可或缺的。国内外文献中有通过电机转速反馈来控制泵的转速,这样转速不变流量也不变,但这种结论需要假设齿轮泵的效率不变。因为泵在不同情况下效率是不同的,而且整个反馈也需要时间,因此在测试发动机变速过程中的油量是有误差的。

既要流量准又要响应快,本文采用步进电机带动一个比较大的齿轮泵供油,齿轮泵型号是CBK-F1.0F,每转一圈输出的流量是1mL,通过步进电机精确控制齿轮泵,实现了利用转速去控制流量,因而只需精确控制步进电机的转速就可以实现精确控制流量,燃油流量测控原理如图3所示。采用步进电机带动齿轮泵这种方法,泵的转速受出口压力影响较小,流量可以始终保持只随转速变化。由于起动时发动机压力低,通过流量计校准,在起动过程中流量偏差很小,因此出口压力对流量的影响可忽略不计。整个系统又是响应迅速的开环控制,流量校准也可以在常压下进行,不必考虑出口压力。为了方便起见,可以事先测量其不同转速下的流量,进而得到转速与流量的关系,由于这个关系在试验中基本不变,因此后续试验可以直接采用。

1.2 油门控制

油门控制包括计算机控制与手动控制。计算机控制是采用LabVIEW通过事先输入的供油规律曲线,通过控制步进电机频率,确定其供油速率。但为掌握发动机的供油规律,得到控制时序,需发动机测试台方便操作,因此手动控制更有效率,结构如图4所示。

手动控制是通过油门杆供油,供油规律具有灵活性,特

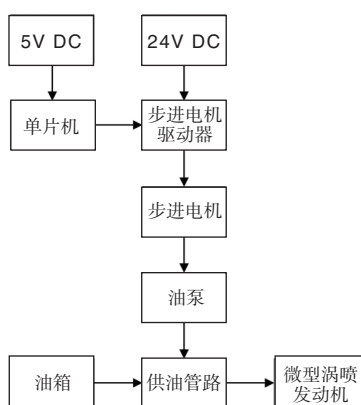


图3 燃油流量控制原理图

Fig.3 Schematic diagram of fuel flow control

别是在还没有得到特性曲线的时候更容易操作,进而摸索规律。油门杆与推力杆类似,通过半圆运动调节流量大小,油门杆连接一个角位置器,在不同角度时角位置器输出不同电压,电压经数据采集卡进入计算机,计算机输入不同的电压值时,步进电机输出不同的频率,实现步进电机的不同转速,从而间接控制油量。

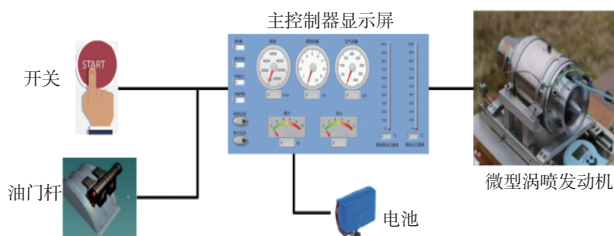


图4 油门杆控制结构图

Fig.4 Schematic diagram of throttle control

2 起动控制试验

微型涡喷发动机控制主要可以分为起动、加减速以及停车三个过程,而发动机能够可靠起动又是后续过程的重要前提。发动机起动过程异常复杂,需控制多种输出变量,目前也很难用精确的理论计算来分析及模拟。对于起动过程的分析主要依靠工程人员的技术经验和试验数据验证。在进行微型涡喷发动机起动试验过程中,起动超温故障时有发生,轻则烧毁发动机尾喷管处的温度传感器,重则会伤及涡轮,减少发动机寿命。因此,起动超温问题是微型涡喷发动机起动控制要解决的关键问题之一。

起动过程中的起动超温最大可能原因是起动供油量过大,导致供入燃烧室的燃油流量增大或分布不均匀,造成发动机燃烧室富油燃烧,释放出大量热量,由于发动机起动时转速不高,涡轮部件从高温燃气中提取能量对外做功能力

不强,从而导致涡轮后温度急剧上升,超过起动温度限定值,造成起动超温。因此,起动超温的排除最终将落在起动供油量控制上。

为了实现在微型涡喷发动机起动过程中精确供油,从而解决起动超温问题,需从硬件与软件两方面来考量。在硬件方面,通过步进电机精确控制齿轮泵,实现了利用转速去控制流量,因而只需精确控制步进电机的转速就可以实现精确控制流量。通过对对象发动机进行大量的起动特性摸底试验,结合试验数据不断对控制时序进行优化,最终整合得出某型微型涡喷发动机地面起动控制时序,如图5所示。

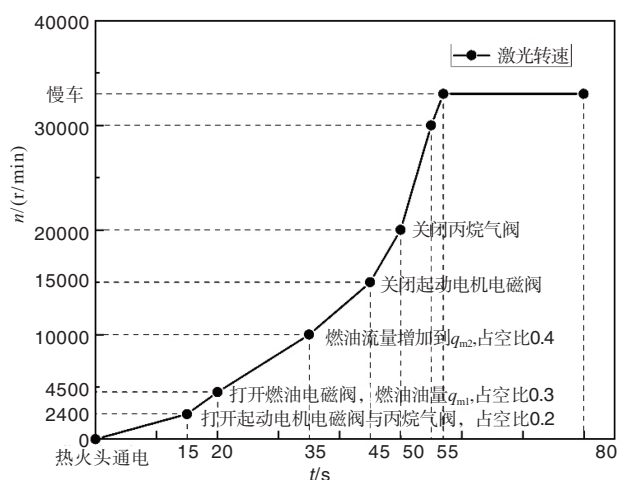


图5 起动时序控制流程

Fig.5 Start sequence control process

3 结果分析

在保证微型涡喷发动机能够迅速可靠地完成起动过程的前提下,通过采用步进电机带动齿轮泵的方法精确供油,严格按照控制时序进行起动控制试验,利用实测数据绘制了发动机燃烧室出口温度随时间变化的温度曲线,如图6所示。涡轮后温度、尾喷管出口温度随时间变化的温度曲线图,如图7所示。

由图6可知,燃烧室出口温度有两段明显的爬升,在35s之前,由于供给发动机的主要是助燃丙烷气体及少量的燃油,因此温度上升速度缓慢,在第35s将燃油流量增大后,燃烧室温度迅速上升。优化前与优化后的第35s燃烧室出口平均温度最大降差达59℃,且从第40s之后到燃烧室温度到达峰值之间,其温度爬升速度相比于优化之前更快。优化前后分别使用两个温度探头作对照,以降低试验误差。优化前燃烧室出口温度在第60s达到最高温度757℃,优化后在第57s达到最高温度705℃,优化前后最高温度有明显

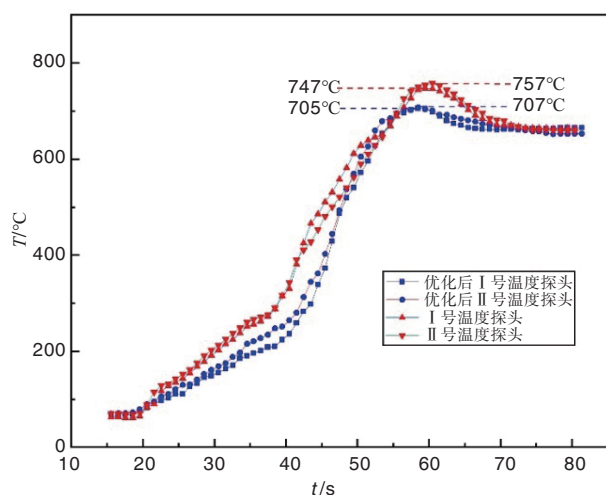


图6 燃烧室出口温度对比

Fig.6 Comparison between combustor outlet temperature

降低,最高温度降差达到52°C,且提前到达峰值。

由图7可知,涡轮后温度和尾喷管出口温度的爬升趋势同燃烧室出口温度一致,随着助燃丙烷在燃气中占比越来越小,涡轮后温度和尾喷管出口温度在第35s前后发生改变,且到达峰值后都有下降的趋势,最终,涡轮后温度稳定在600°C左右,尾喷管出口温度稳定在500°C左右。这是由于发动机转速从零升至怠速,进入发动机的空气量加大,使得燃烧室出口温度降低,进而导致涡轮后温度和尾喷管出口温度下降。优化前涡轮后温度在第56s达到最高温度752°C,尾喷管出口温度在第57s达到最高温度805°C,优化后涡轮后温度在第54s达到最高温度692°C,尾喷管出口温度在第52s达到最高温度750°C。控制时序优化前后最高

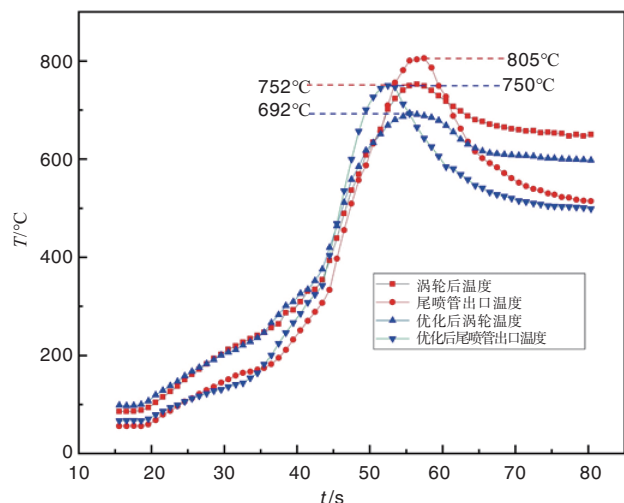


图7 涡轮后温度与排气温度对比

Fig.7 Comparison between temperature after turbine and exhaust temperature

温度有明显降低,其涡轮后最高温度降差达到60°C;尾喷管出口最高温度降差达到55°C;且都提前到达峰值。

综上可知,控制程序能够很好地按照时序来驱动步进电机,通过控制步进电机的转速,达到了准确控制燃油油量的目的,满足对本文对象发动机的控制需求。不仅可以有效地规避起动超温故障的发生,从根本上解决问题,而且可以缩短发动机的起动时间。经多次试验验证,微型涡喷发动机可以按照预期顺利完成整机起动。

4 软件部分

试验平台软件部分(见图8、图9)利用LabVIEW开发环境进行开发。采用模块化设计思想,根据其测控系统需求,对系统进行模块划分,主要由参数配置、数据采集、数据处理与存储、数据显示与分析、燃油流量控制、通信等模块组成。与硬件系统相结合,软件系统的主要功能包括:数据的采集与处理、起动控制、加减速控制以及数据显示与存储等。

通过LabVIEW软件对微型涡喷发动机进行测试,获取试验数据,整合得出发动机地面起动控制时序,利用试验数据进一步对其优化,后续根据符合控制规律的试验数据及控制时序编写单片机程序,从而实现对某型微型涡喷发动机的计算机控制。

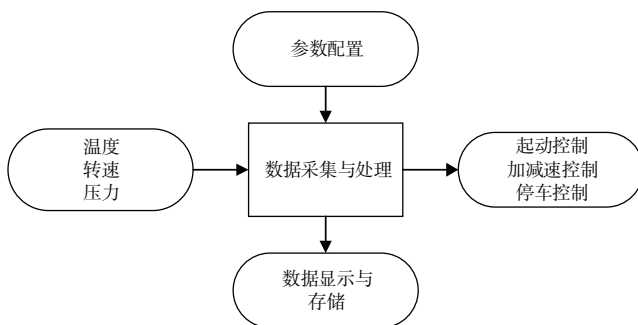


图8 软件系统功能

Fig.8 Software system functions

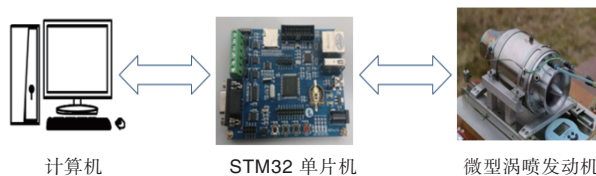


图9 单片机控制

Fig.9 MCU control

5 结束语

本文在现有某型微型涡喷发动机的基础上,通过对其

需要测量的参数进行研究,搭建了一套适用于该型发动机运行参数测量的试验平台。为了精确控制油量,从而解决起动过程中遇到的超温问题,本文采用步进电机带动齿轮泵的方法供油,通过控制步进电机转速去间接控制燃油流量,实现了流量准、响应迅速的燃油流量开环控制。通过对某型发动机进行大量的起动特性摸底试验,结合试验数据对控制时序进行优化,最终整合得出某型微型涡喷发动机地面起动控制时序。严格按照控制时序进行试验,得到如下结论:

(1)燃烧室出口、涡轮后及尾喷管出口最高温度有明显下降,且最低降差达到 52°C ,最高降差达到 60°C 。

(2)燃烧室出口温度、涡轮后温度及尾喷管出口温度提前到达起动阶段的温度峰值,且到达峰值的最快时间较优化前缩短了6%。

(3)通过试验对起动控制时序的研究,为微型涡喷发动机的起动控制建立了有效的研究方法,不仅解决了微型涡喷发动机的起动超温的问题,还可以缩短其起动时间,对该型发动机的控制具有重要的工程应用价值。

AST

参考文献

- [1] 全亚洲. 微型涡轮发动机试验台设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
Quan Yazhou. Test bench design of the Micro-turbine engine [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [2] 王栋. 微型涡喷发动机试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
Wang Dong. Experimental study on micro-turbojet engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [3] 张旭东, 郝明月, 尹航, 等. 基于SWOT-PEST分析的无人靶机产业发展研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(7): 80-84.
Zhang Xudong, Hao Mingyue, Yin Hang, et al. Research on the development of unmanned aerial target industry based on SWOT-PEST analysis[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(7): 80-84. (in Chinese)
- [4] Choi S M, Kim S, Myong R S, et al. Experimental investigation of infrared signal characteristics in a micro-turbojet engine ERRATUM[J]. Aeronautical Journal New Series, 2019, 123 (1263): 1.
- [5] 徐建国, 张天宏. 微型涡轮发动机燃油闭环控制起动方法[J]. 航空动力学报, 2012(3): 226-231.
- [6] Xu Jianguo, Zhang Tianhong. Start-up method of micro turbine engine with closed-loop fuel flowrate control [J]. Journal of Aerospace Power, 2012(3): 226-231. (in Chinese)
- [7] 王俊琦, 赵海刚, 张媛. 辅助动力装置的稳态和过渡态特性性试试飞[J]. 航空科学技术, 2020, 31(9): 41-46.
Wang Junqi, Zhao Haigang, Zhang Yuan. Flight test of steady and transient characteristics of APU [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(9): 41-46. (in Chinese)
- [8] 李耀华, 韦冬冬. 基于LabVIEW的微型发动机燃烧室试验台测控系统[J]. 飞机设计, 2019(4): 24-27.
Li Yaohua, Wei Dongdong. Measurement and control system of micro engine combustor test bed based on LabVIEW [J]. Aircraft Design, 2019(4): 24-27. (in Chinese)
- [9] 黄杰. 航空发动机试验平台设计及其稳定性研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016.
Huang Jie. Designing and stability research of aero-engine experimental platform [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] 梁德旺, 黄国平. 厘米级微型涡轮喷气发动机主要研究进展[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(2): 9-13.
Liang Dewang, Huang Guoping. Recent development and key techniques of micro-turbine in centimeter size [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(2): 9-13. (in Chinese)
- [11] 苏三买, 杨恒辉, 屠秋野, 等. 微型涡轮发动机综合测控系统设计[J]. 航空动力学报, 2009(9): 229-234.
Su Sanmai, Yang Henghui, Tu Qiuye, et al. Design of micro turbo engine integrated measurement and control system [J]. Journal of Aerospace Power, 2009(9): 229-234. (in Chinese)
- [12] 张宝诚. 航空发动机试验和测试技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
Zhang Baocheng. Aero engine testing and testing technology [M]. Beijing: Beihang University Press, 2005. (in Chinese)
- [13] Tang Wei, Wang Lijian, Gu Jiawei, et al. Single neural adaptive PID control for small UAV micro-turbojet engine [J]. Sensors, 2020, 20(2): 345.
- [14] 鹿麟, 王少峰. 小型航空发动机测控系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2013(1): 121-125.
Lu Lin, Wang Shaofeng. Design of measurement and control system for small aero engine [J]. Techniques of Automation

- and Applications, 2013(1):121-125. (in Chinese)
- [14] 杨欣毅, 史佩, 刘海峰, 等. 新型小涡轮喷气发动机数控系统仿真试验台[J]. 试验技术与管理, 2009, 26(1):56-58.
- Yang Xinyi, Shi Pei, Liu Haifeng, et al. A new digital control system simulation test bed for small turbojet engine [J]. Experimental Technology and Management, 2009, 26(1): 56-58. (in Chinese)
- [15] 李国鸿. 发动机启动超温和转速悬挂故障自动检测[J]. 测控技术, 2016, 35(9):43-46.
- Li Guohong. Auto - detecting of aero-engine EGT over-temperature and rotor hang malfunctions[J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(9):43-46. (in Chinese)
- [16] 秦海勤, 徐可君. 某型航空发动机工作超温故障研究与分析[J]. 燃气轮机技术, 2015, 28(3):39-43.
- Qin Haiqin, Xu Kejun. Research and analysis of a certain aero-engine working over-temperature fault gas turbine technology [J]. Gas Turbine Technology, 2015, 28(3):39-43. (in Chinese)
- [17] 秦海勤, 徐可君. 某型航空发动机启动超温故障研究与分析[J]. 燃气轮机技术, 2016, 29(3):39-43.
- Qin Haiqin, Xu Kejun. Research and analysis of a certain type of aero-engine starting over-temperature fault [J]. Gas Turbine Technology, 2016, 29(3):39-43. (in Chinese)
- [18] 佟永军. 航空发动机启动T₄超温故障诊断[J]. 航空维修与工程, 2007(1):54-55.
- Tong Yongjun. Trouble diagnosis of T₄ over-temperature of engine [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2007(1): 54-55. (in Chinese)
- [19] 曾可弄, 唐瑞, 曹云鹏, 等. 某型燃气轮机启动超温故障原因分析[J]. 机械工程师, 2020(2):151-153.
- Zeng Kehui, Tang Rui, Cao Yunpeng, et al. Analysis on an over-temperature fault of gas turbine [J]. Mechanical Engineer, 2020(2):151-153. (in Chinese)

Research on Starting Control of Micro Turbojet Engine Based on Experiment

Peng Hongbo, Yang Chuang, Yu Junli, Feng Yuan

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract: The important parameters of the micro turbo engine are measured by setting up the experimental bench. In order to control the fuel flow stably and accurately to solve the over-temperature problem in the starting control process, a stepper motor is used to drive a gear pump to supply fuel, and indirectly controls the flow by controlling the speed, so as to realize the open-loop fuel flow control with accurate flow and quick response. Through a large number of basic tests on the starting characteristics of the target engine, combined with the optimization of control timing sequence based on the experimental data, the time sequence of ground starting control of a certain type of micro turbo engine is obtained through integration. By adopting this method to supply oil, the starting control experiment is carried out in strict accordance with the control sequence. The results show that, under the premise that the engine can complete the starting process quickly and reliably, the maximum temperature at the exit of combustor, behind the turbine and at the exit of the exhaust nozzle decreases obviously. Combustor outlet temperature, turbine outlet temperature and nozzle outlet temperature rise faster, reach the peak time earlier, and the peak is lower. It not only solves the problem of starting over temperature, but also shortens the starting time of the engine. The study of the start control sequence through experiments establishes an effective research method for the start control of the micro turbo engine, which has important engineering application value for the control of the engine.

Key Words: micro turbo engine; test bench; starting over temperature; fuel control; test technique

Received: 2021-01-09; **Revised:** 2021-02-18; **Accepted:** 2021-04-20

Foundation item: Basic Scientific Research Operating Expenses of Central Universities (3122016C003)