

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.026

# 无人机涡喷发动机起动加速试验研究

黄 健, 黄 李, 曲 鹏

(南京模拟技术研究所, 江苏 南京 210016)

**摘要:**针对某无人机用涡喷发动机的起动加速性能要求以及为了保证发动机起动加速过程中的安全性和可靠性,对发动机起动加速过程中的主要影响因素进行了分析,设计了单油泵双油路、火药起动、烟火点火器以及主油路电磁阀控制等控制方案;同时,为了保证发动机实现快速起功能,在起动点火过程中采用开环控制,在慢车以上状态加速过程中则采用转速闭环控制;基于地面台架试车试验和无人机搭载飞行试验,获得了发动机的起动时间、输出转速、排气温度和压力等参数值。试验研究结果表明,该发动机具有较好的起动加速性和可靠性。

**关键词:**涡轮喷气发动机;起动性能;控制方案;地面试验;飞行试验

中图分类号:TP273;V233.75

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)05-0662-04

## Starting and acceleration experimental study of pilotless turbojet engine

HUANG Jian, HUANG Li, QU Peng

(Nanjing Research Institute on Simulation Technique, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the starting and acceleration performance requirement of pilotless turbojet engine and the safety and reliability of the engine starting and acceleration process, the main influence factors were studied, such as single pump double oil system, gunpowder starter, fireworks igniter and the main solenoid valve. Meanwhile, in order to realize the rapid start of engine function, the open loop control was used in the starting process and the closed loop control was used in the above-idle state. The control scheme was verified by the ground test and the flight test, then the starting time, output speed, exhaust temperature and pressure were acquired. The results indicate that the engine has a good starting and acceleration performance and reliability.

**Key words:** turbojet engine; start performance; control scheme; ground test; flight test

## 0 引 言

无人机用涡喷发动机的起动加速过程就是无人机的起飞过程。无人机首先由助推器助推加速,在指定的时间内(一般为 6 s ~ 7 s)达到指定的飞行速度与高度后与助推器分离,并进入巡航状态<sup>[1]</sup>。因此,无人机用涡喷发动机必须在这段时间内完成起动加速,达到巡航工作状态,并提供巡航飞行所需的推力。

对于无人机来说,作为其巡航动力装置的涡喷发动机能否正常起动、完成与助推器的接力,决定了它能否顺利地进入巡航状态,能否按照预订的计划打击目

标从而完成其战斗使命<sup>[2]</sup>。

虽然在无人机发射过程中,发动机起动加速过程持续的时间很短。但是,无人机用涡喷发动机的起动加速是一个非稳态过程,具有一定的特殊性和复杂性。因此它是无人机用涡喷发动机飞行的故障多发区,也是研究的重点问题。若起动加速过程设计不当,将导致飞行试验的失败。因此,起动加速过程对无人机用涡喷发动机来说是至关重要的<sup>[3]</sup>。

无人机用涡喷发动机起动加速过程控制方案为:采用火药起动方式进行,利用火药起动机产生的高温、高压燃气直接吹转发动机,在涡轮转子带转过程中点

火,使发动机在很短的时间内达到预定的工作状态和转速。之后发动机按照设定的控制方案和供油规律加速至巡航状态<sup>[4]</sup>,从而实现无人机火箭助推推力接力,并为无人机提供持续稳定的巡航推力。

## 1 起动过程分析

为了满足无人机用涡喷发动机快速安全起动以及加速性能要求,本研究根据发动机起动加速过程的工作特点分别对单油泵双油路控制、火药起动、烟火点火器以及主油路电磁阀4个主要设计影响因素进行分析。

### 1.1 单油泵双油路控制

为防止起动过程中富油导致发动机起动失败,或无法在期望时间内成功起动,发动机燃油系统采用单油泵双油路控制设计,即分为起动油路和主油路。起动时,起动油路供油,此时供油量较小,以防止低转速时富油超温、转速热悬挂,甚至富油熄火现象的发生。因此,起动油路提供发动机燃烧室具有最佳混合油气比的初始供油量,以实现发动机成功点火。点火成功后主油路电磁阀接通主油路供油,主油路供油量大,以保证发动机转速快速上升的供油需求。

### 1.2 火药起动

发动机采用火药起动方式。涡轮在火药冲击作用下发动机转速可迅速上升至接近慢车转速。火药的能量根据涡轮可承受的冲击强度以及点火转速要求确定。若火药能力不足将导致涡轮冲击转速过低,从而使发动机起动时间延长。

### 1.3 烟火点火器

发动机火药起动过程中,烟火点火器同时对燃烧室蒸发管进行预热作用,使燃油快速雾化以满足点火条件。若烟火点火器对燃油预热雾化作用不够,将导致燃油燃烧不充分,从而使发动机起动时间延长。

### 1.4 主油路电磁阀

发动机在火药冲击作用下成功点火,达到预定工作状态后打开主油路电磁阀,此时以主油路供油为主,以使发动机转速持续快速上升。主油路电磁阀打开的时机是影响发动机起动过程加速时间的主要因素之一。主油路电磁阀打开时间过早,火药冲击作用还没有结束,从而降低了火药冲击作用的工作效率,同时可能导致富油超温;若主油路电磁阀打开时间过晚,进入发动机的燃油流量不足,此时火药冲击作用已经结束,导致发动机转速下降,从而使发动机起动时间延长。

## 2 控制方案设计

某无人机用涡喷发动机的起动过程采用转速开环控制,在慢车以上状态采用PID控制器实现转速闭环控制。控制方案描述如下:

$$pla = f(n) \quad (1)$$

式中: $pla$ —发动机的输入油门值, $n$ —发动机的输出转速值。

通过对发动机火药起动特性、发动机点火起动工作包线以及地面台架试车试验数据的整理分析,得到的发动机起动加速过程的供油曲线<sup>[5-7]</sup>如图1所示,横轴为转速百分比,设计点转速为100%转速记为 $n_{des}$ ;纵轴为油门值百分比,最大油门值为100%记为 $Pla_{max}$ 。

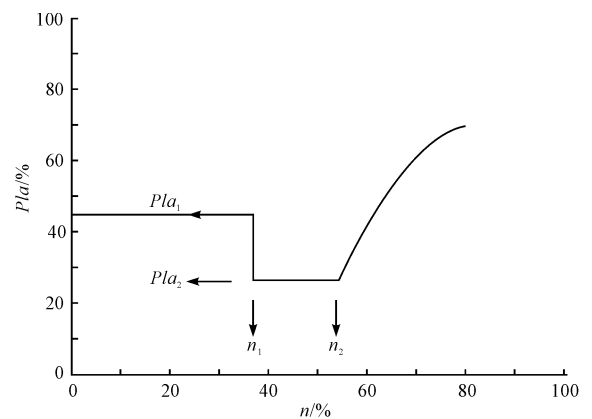


图1 发动机起动加速过程供油曲线图

如图1所示,发动机起动加速过程控制规律设计如下:

(1)当 $n < n_1$ ,即发动机低转速时初始油门值设置较高,使发动机起动燃油管路快速填充,以缩短燃油填充时间,在火药冲击和起动油路初始供油的作用下,发动机转速迅速上升;

(2)当 $n_1 < n < n_2$ 时,打开主油路电磁阀,为了避免发动机此时富油超温,同时将油门值由 $Pla_1$ 降低为 $Pla_2$ ,为了使进入燃烧室的燃油充分燃烧并防止燃烧室富油,保持油门值不变;并保持适当的延时,以使进入燃烧室的燃油充分燃烧;

(3)当 $n > n_2$ 时,进入转速闭环控制规律调节,使发动机转速持续快速上升。按照设定的加速供油规律调节油门,同时对发动机进行超温和超转保护,以防止发动机进入不稳定工作区域。

根据发动机起动加速过程控制方案及供油曲线,形成发动机起动加速过程的控制时序如图2所示。

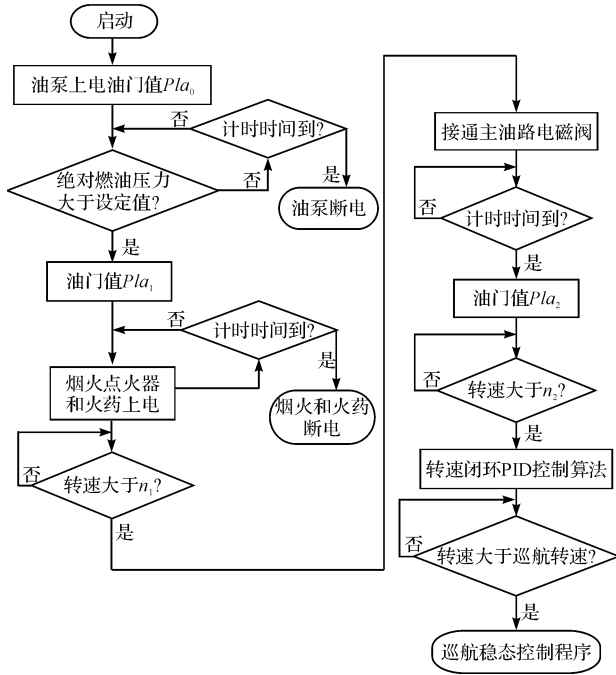


图2 发动机起动加速过程控制时序图

从图2中可以看出,当转速大于 $n_2$ 时发动机进入转速闭环控制程序。转速闭环控制规律设计基于发动机的辨识模型采用经典的PID控制算法来进行控制参数整定和仿真,同时根据台架试车控制效果对控制参数进行优化,使其与发动机工作特性相匹配,以实现快速、安全地转速闭环控制。

PID控制算法如下:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (2)$$

$$\Delta u(k) = K[e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_i}e(k) + \frac{T_d}{T}(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))] \quad (3)$$

式中: $K$ —比例系数, $e(k)$ —发动机期望转速与实际转速之间的转速差, $T$ —采样周期, $T_i$ —积分时间常数, $T_d$ —微分时间常数, $u(k)$ —控制量即油门信号<sup>[8-9]</sup>。

## 3 试验验证

### 3.1 地面台架试车试验

某无人机用涡喷发动机系统主要由发动机本体、发电机、电源变换器、电子控制器、传感器系统、燃油泵以及电磁阀等执行机构组成。

本研究基于发动机的起动加速控制时序以及转速闭环控制规律进行发动机地面台架试车试验,以验证发动机起动加速控制方案和控制规律的可行性以及发动机的加速性能<sup>[10-12]</sup>。

发动机地面台架试车试验原理如图3所示,发动机地面台架试车试验曲线如图4所示。

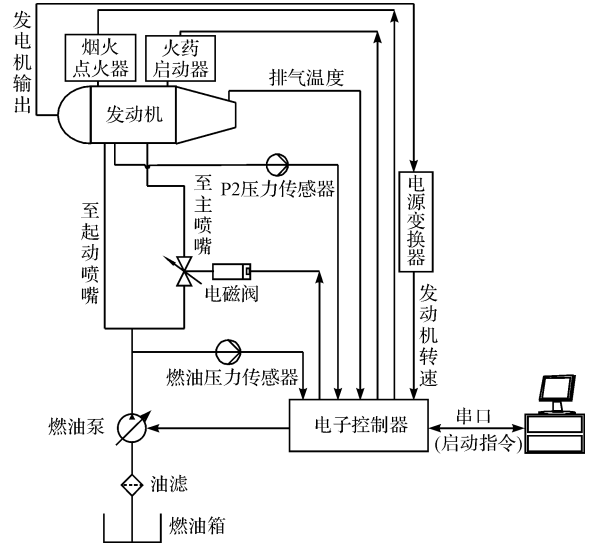


图3 地面台架试车试验原理图

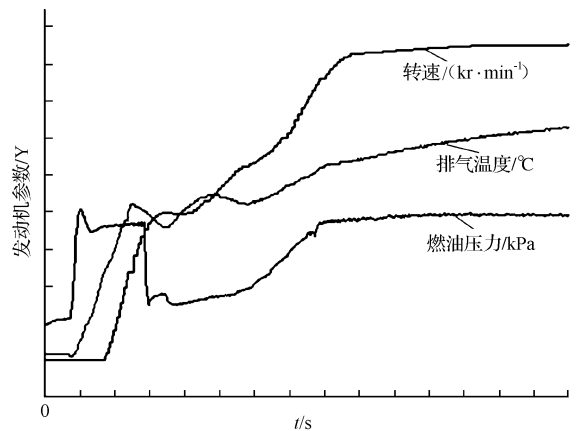


图4 发动机地面台架试车试验曲线图

如图4所示,当燃油压力大于设定值后起动燃油管路填充完毕,此后起动火药和烟火点火器同时工作,起动火药被点燃,使发动机转速迅速上升,同时发动机的排气温度也迅速上升。当主油路电磁阀打开以后,发动机转速持续稳定地上升,当发动机转速大于设定值后进入转速闭环控制程序直至达到目标转速和期望状态。从图4中可以看出,发动机的整个起动加速过程中,无富油超温、超转、转速热悬挂等异常现象,起动加速过程满足期望加速时间要求,发动机具有良好的起动加速性能。

### 3.2 无人机挂载空中点火飞行试验

本研究将该涡喷发动机挂载所内某型无人机进行空中点火飞行试验,以进一步验证发动机的起动加速性能以及控制方案。无人机首先由火箭筒助推发射,无人机加速升空的过程中,发动机接收到启动指令后自动空中点火以实现与火箭筒助推器的推力接力,在规定时间内加速至巡航状态,提供无人机巡航飞行所需的推力。

该涡喷发动机挂载飞行及试验曲线如图5、图6所示。



图5 发动机挂载无人机空中点火飞行试验图

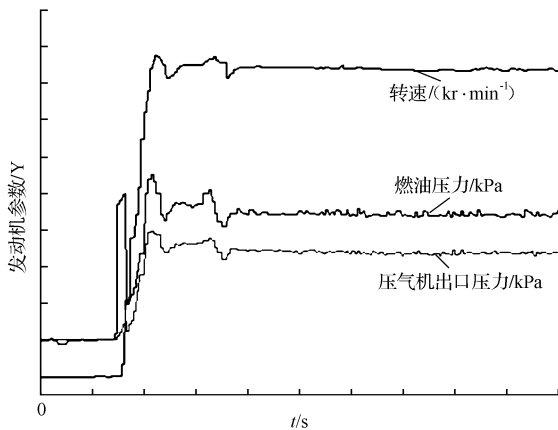


图6 发动机挂载无人机飞行试验曲线图

如图6所示,发动机在某型无人机挂载飞行试验过程中其状态参数采集均正常,表明发动机工作状态正常。发动机起动加速时间满足指标要求,且飞行试验时间比地面试车试验时间短,这是由于无人机发射过程中产生的风车效应所致。无人机助推火箭脱离后发动机空中点火起动,接力过程平稳,无人机没有姿态扰动和掉高现象,无人机继续飞行10 min后开伞回收,全过程中发动机工作状态稳定可靠,验证了发动机起动加速控制时序以及转速闭环控制规律的可行性和有效性,满足加速性能指标要求。

## 4 结束语

本研究通过对发动机起动加速过程进行分析,基

于理论计算以及对试验数据进行分析处理,对某型无人机用涡喷发动机采用火药起动的方式并设计了发动机的起动加速控制方案;确定了发动机的起动加速控制时序和转速闭环控制规律,并通过了发动机地面台架试车以及无人机挂载飞行试验验证。试验过程中发动机起动加速过程快速、安全、可靠,发动机无富油超温、超转以及转速热悬挂等异常现象,满足起动加速性能要求。试验结果表明,笔者设计的发动机起动加速控制方案切实可行且满足实际使用需求,适用于无人机用涡喷发动机的控制和试验设计分析。

## 参考文献 (References):

- [1] 郑严. 弹用涡喷发动机启动加速过程试验研究[J]. 推进技术, 2000, 21(4): 5-8.
- [2] 杨欣毅, 董可海, 田宇, 等. 弹用涡喷发动机地面起动试验研究[J]. 实验技术与管理, 2011, 28(12): 47-51.
- [3] 于军, 于守志. 弹用涡喷发动机飞行试验启动加速性能仿真[J]. 推进技术, 2001, 22(6): 454-457.
- [4] 陈玉春, 陆尧, 王菊金, 等. 涡扇发动机炮式起动数学模型及起动特性研究[J]. 航空学报, 2002, 23(6): 568-570.
- [5] 廉小纯, 吴虎. 航空燃气轮机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [6] 郑绪生. 某型涡轴发动机起动建模技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学能源与动力学院, 2005.
- [7] 骆广琦, 宋嶝源, 吴宝勤. 航空发动机地面试车验收空中工作点性能的机理研究[J]. 推进技术, 2010, 31(2): 1-4.
- [8] 谢光华, 牛天华, 王亿军, 等. 某型弹用涡喷发动机启动加速控制规律设计[J]. 推进技术, 2003, 24(6): 232-235.
- [9] 孙健国. 现代航空动力装置控制[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.
- [10] 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.
- [11] 杨欣毅, 史佩, 刘海峰. 新型涡喷发动机数控系统仿真试验台[J]. 实验技术与管理, 2009, 26(1): 56-58.
- [12] 丁力军, 丁海生. 无人机发动机综合测试系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(5): 452-454.

[编辑: 李辉]

本文引用格式:

黄健, 黄李, 曲鹏. 无人机涡喷发动机起动加速试验研究[J]. 机电工程, 2014, 31(5): 662-665.

HUANG Jian, HUANG Li, QU Peng. Starting and acceleration experimental study of pilotless turbojet engine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(5): 662-665.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>