

微型涡轮发动机控制系统仿真及台架试验^{*}

张天宏, 黄向华, 曹 谦

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 在某微型涡轮发动机控制系统开发过程中, 为研究该发动机控制规律, 提出一种半物理仿真和台架试验结合的研究方法。设计了包含电子控制器在回路的半物理仿真试验, 通过分析原控制逻辑以及起动过程存在的问题, 提出对起动控制规律的改进和优化, 开展了基于原配电子控制单元和工控机的台架试验, 验证了优化后的控制规律, 并将其应用于控制器开发。本文提出的方法可避免大量的实物台架试验, 缩短控制器的研制周期。

关键词: 微型涡轮发动机⁺; 控制系统; 半物理仿真; 台架试验

中图分类号: V235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2006) 05-0445-05

Control system simulation and bed test for micro turbine engine

ZHANG Tian-hong HUANG Xiang-hua CAO Qian

(Coll of Energy and Power, Nanjing Univ of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract A method combining semi-physical simulation and bed test was proposed for studying the control scheme in the development process of the control system for Micro Turbine Engine (MTE). The experiment platform was developed with Electronic Control Unit (ECU) in loop. After analyzing the original control logic and the problems encountered in the startup process, the improvement and optimization of the start control scheme were proposed and verified by the bed test with the original ECU and an industry computer in loop respectively. The whole control scheme improved was adopted by the newly developed controller. The method proposed has short development period for the fact that a lot of ignition experiments are avoided.

Key words Micro turbine engine⁺; Control system; Semi-physical simulation; Bed test

1 引 言

微型涡轮发动机 (MTE) 体积小、重量轻、结构紧凑, 在高速微型无人驾驶飞机上具有重要的应用前景^[1~4]。与常规发动机相比, 微型涡轮发动机在供油方式和起动过程方面具有特殊性。由于发动机尺寸小、转速范围宽、空气流量小、对燃油流量大小变化比较敏感, 经常导致起动过程转速悬挂。某厘米级 6kg 推力的单转子微型涡轮发动机配备了控制器, 但其功能有限, 仅采用开环控制。另外发动机转速控制不稳, 因此需要开发一种新的低成本的全权限数字电子控制 (FADEC) 系统。

研制微型涡轮发动机控制系统首先需要解决起

动控制规律的确定问题。若利用实物试验来研究控制规律, 风险大、成本高。本文提出建立包含电子控制器等实物在回路的仿真试验系统, 对控制规律进行改进和优化, 然后通过台架试验验证。

2 微型涡轮发动机控制系统简介

该微型涡轮发动机采用高速直流电机起动, 带动离心式压气机转子, 为起动气体丙烷提供合适的气流速度, 丙烷燃烧气化燃油, 气化的燃油在燃烧室燃烧推动涡轮工作^[5,6]。图 1 是该发动机控制系统连接示意图, 电子控制器 (ECU) 采集转速 n , 尾气温度 T_a 和油门杆指令信号 P_{in} , 发出控制指令控制启动电机、点火器、丙烷阀、燃油阀和燃油泵等执行机构动作, 并

^{*} 收稿日期: 2005-10-15 修订日期: 2005-12-29。

基金项目: 国防科研基金 (K1601060711)。

作者简介: 张天宏 (1968—), 男, 副教授, 博士, 研究领域为航空发动机控制、建模与故障诊断。

指示发动机的当前状态。

起动控制规律是发动机控制规律研究的关键^[7],该微型涡轮发动机起动控制规律大致可以分为三个阶段:第iv阶段为电机单独做功,带动转子;第二阶段依次打开点火开关、丙烷阀、油阀和油泵,这时电机、丙烷气和燃油共同做功;第三阶段为当点火成功且到达一定转速后,停电机,关丙烷阀,该阶段燃油做功,直到达到慢车状态。

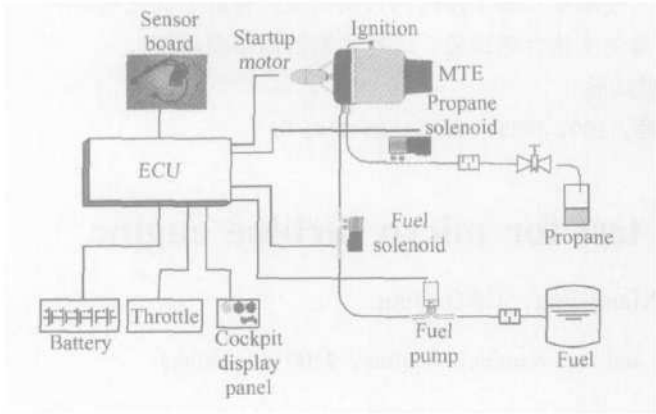


Fig 1 Framework of MTE control system

初步实验发现该微型涡轮发动机难以起动成功,这是由于:(1)微型涡轮发动机起动过程特性及起动供油规律与常规发动机不同,各执行机构的开启与关闭时机、丙烷气与燃油流量的控制精度对发动机起动性能影响很大;(2)燃油系统供油不稳,起动过程中由于富油而频繁出现热悬挂现象^[7~9]。

3 基于工控机的半物理仿真试验

3.1 试验原理

本文采用辨识的方法研究原控制规律。该发动机的全部控制规律包含在 ECU 的控制程序中。构建含控制系统实物在回路仿真试验环境,将 ECU 作为“黑箱”对象,模拟“黑箱”的不同输入情况,通过分析输入输出信息对“黑箱”内部的逻辑进行辨识,即可获得该发动机在不同状态下的控制规律。

图 2 为基于工控机的半物理仿真试验原理框图。采用工控机和 1711、1780 接口卡构建,并通过端子板与电子控制器进行信号连接。该半物理仿真试验方案具有使用灵活方便、运行稳定、成本低等优点,能保证精度与实时性要求,并能应用于自主设计的控制器研制过程中的半物理仿真实验。

工控机内装有发动机模型,根据控制器产生的点火脉冲 L_p 、丙烷阀 L_r 、燃油阀 L_f 以及供油量 W_f 等信

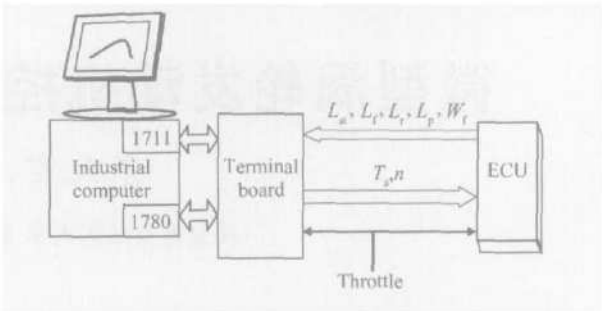


Fig 2 Principle of semi-physical simulation based on industrial control computer

号,模拟出发动机的状态,由接口卡输出转速信号(频率量)和尾气温度信号(模拟量)到控制器,控制器根据发动机状态以及油门杆信号给出控制指令。其中 L_{sb} 、 L_b 、 L_r 和 L_p 均为开关逻辑电平信号, W_f 为 2.93kHz 占空比在 0~55% 可调的 PWM 信号, n 为 0~3kHz 频率信号, P_{in} 为 50Hz 的 PWM 正脉冲宽度为 0.7~2.3ms 信号, T_a 为 0~5V 模拟量。

单转子微型涡轮发动机模型可以由以下带纯时延的惯性环节近似表示

$$G(s) = \frac{\delta n(s)}{\delta W_f(s)} = \frac{K}{(Ts + 1)} e^{-\tau s} \quad (1)$$

Table 1 Engine model parameters K , T , τ versus rotor speed n

$n / (kr/min)$	$K / (r/min / \%)$	T / s	τ / s
50	7763	0.64	0.34
55	6126	0.63	0.40
60	5767	0.54	0.39
65	4752	0.47	0.27
70	4553	0.39	0.14
80	4648	0.32	0.22
90	3871	0.28	0.13
100	3453	0.21	0.13
105	3362	0.20	0.16

模型参数通过开环阶跃响应法测定,在发动机转速为 50~105kr/min 的范围内选择 9 个稳态工作点,进行 0.3% 的燃油量阶跃扰动,采用拟合法求出各点模型参数 K , T , 表 1 为各点的试验模型参数。图 3 为转速在 70kr/min 附近时,发动机实验结果与数学模型仿真曲线的阶跃响应对比情况,可以看到模型的动静态响应与真实发动机输出基本一致。该模型可用于半物理仿真的初步实验中。

针对微型涡轮发动机 FADEC 系统构成和工作过程,将控制规律分为启动控制、油泵和油阀指令、油门杆控制、超温保护、超温散热、超速保护等方面进行分

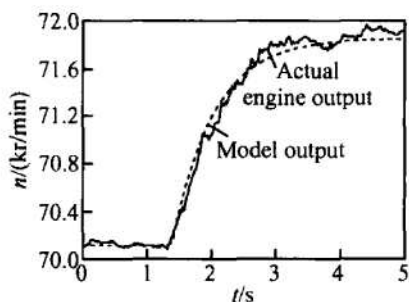


Fig 3 Identification of MTE model using step-response method

专题研究,综合这些实验结果,总结出整套控制规律。

3.2 实验结果分析

半物理仿真的典型试验曲线如图 4 所示,通过分析试验曲线,可以得到微型涡轮发动机起动过程中各执行机构的调节规律:首先通过调节油门杆位置给出起动信号后,电机启动;在电机的带动下,转速达到 3kr/min 时,开始点火,供丙烷气,电机在 2.3s 后停止,延时 4s 后再启动电机,这样可以避免转速过高而点火失败。检查尾气温度,若大于 150°C,则认为点火成功,否则重复使电机停 4s 开 1s 以保持合适的点火转速,直至点火成功;如果点火时间超过 22s 后点火仍不成功,则起动失败,关电机。点火成功后,关点火器和起动电机,打开燃油阀,油泵开始供油,根据泵的特性,首先发出供油尖脉冲(油泵 PWM 信号占空比约 14%;持续 200ms)使燃油尽快到达发动机,然后燃油回到设定的起动供油量(7%~9%)。此阶段电机、丙烷和燃油共同作功,使转速达到 21kr/min 时关电机,延时 3s 后关丙烷阀。

油泵指令从起动供油量开始按照预定供油计划增加,直至转速达到 52kr/min。此时认为进入慢车状态。

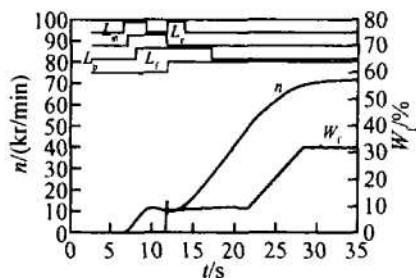


Fig 4 Result of Semi-physical simulation for startup control rule

研究超温保护规律的半物理仿真实验结果如图 5 所示。从试验曲线可以得到:慢车以内没有超温保护,当发动机出了慢车状态且尾气温度大于 840°C 的

时间超过 9.8s 开始执行超温保护。此时 ECU 停止供油恢复初始状态,同时电机启动执行散热保护。

在发动机停车后,若尾气温度大于 145°C,电机带动转子旋转,使发动机散热降温,4.1s 后关闭电机,4.1s 再启动,重复执行最长 23.5s。

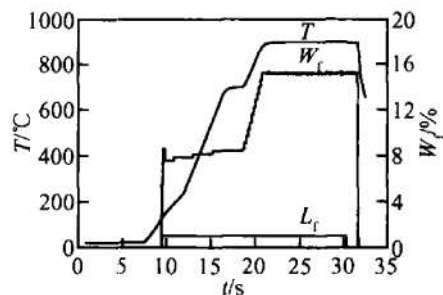


Fig 5 Result of semi-physical simulation for over-temperature protect

ECU 还对超速进行保护,超速保护规律的半物理仿真实验结果如图 6 所示。从实验曲线分析得知:转速超过 155kr/min,油泵指令以 -2.1%/s 的斜率递减,直到转速退回 155kr/min。转速恢复正常值后,油泵指令与油门杆位置之间恢复对应关系。

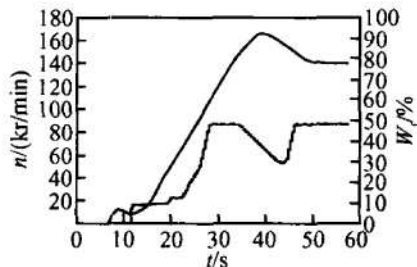


Fig 6 Result of semi-physical simulation for over-speed protection

分析大量仿真试验数据得到该发动机的调节规律为(1)在起动阶段按照一定的逻辑使电机、点火器、气阀、油阀以及油泵共同配合作用,达到快速起动目的;各执行机构的起停时机以及起动供油规律是起动控制的关键;(2)采用超温保护、散热和超速保护逻辑以保证发动机的安全;(3)进入慢车后采用开环控制,根据油门杆位置直接给出供油量,并限制供油量的变化率。通过仿真试验分析得到的调节规律还需要通过台架试验来验证,并通过实验对调节规律进行改进设计。

4 微型涡轮发动机台架试验及控制规律的改进

将微型涡轮发动机固定在试验台上,分别基于原配 ECU 和基于工控机的快速原型机进行台架试验,

以验证和改进控制规律。

4.1 基于原配 ECU 的台架试验

基于原配 ECU 的台架试验设备连接与图 1 是一致的, ECU 采集发动机转速和尾气温度信号, 根据油门杆指令, 发出执行机构的控制指令。另外为了监视发动机工作状态, 采用工控机实时采集和显示 ECU 的输出指令和发动机状态。

针对试验使用的燃油泵供油稳定性差而出现的“热悬挂”现象, 应在起动过程中手动干预供油量。由于无法改变原 ECU 输出的燃油泵控制指令, 采取了通过改变电源电压而改变供油量的措施, 即改进油泵的驱动电路, 对油泵使用单独可调的电源供电, 同时采集并保存电源电压, 以监控供油量大小。

图 7 是基于 ECU 的台架试验结果。台架试验验证了半物理仿真所得到的控制规律。从图 7 可以看出, 在 68s 转速到达 90kr/min 时, 温度信号突然下降到 200℃ 以下, FADEC 系统执行了紧急停车保护。这是由于实验过程中温度传感器从发动机尾喷管壳体脱落。图 7 反映了发动机运行过程中突然熄火时的保护规律, 即当转速达到慢车以上时, 尾气温度应保持在正常的运行状态, 当尾气温度降低到 200℃ 以下时, 控制器认为发动机熄火, 停止燃油泵指令关闭油阀停止供油。这一规律是在半物理仿真试验中没有考虑到的。

4.2 控制规律的改进

结合传感器和执行机构的特点, 通过对半物理仿真及台架试验结果的分析, 本文对控制系统控制规律进行了以下改进。

(1) 将起动电机的启/停控制改为 PWM 控制。起动电机为永磁高速直流电机, 原系统通过控制直流电机电源的通断控制电机的运转, 约 3s 就能将发动机转子从静止状态带到 14kr/min。由于点火需要合适的转子转速, 而在起动过程中, 开关控制的电机间断运行, 转速很难控制。采用 PWM 控制, 可以精确控制电机转速, 缩短起动时间, 提高起动可靠性, 并避免电机频繁启停。

(2) 对燃油泵进行标定。微型发动控制系统使用的燃油泵为直流电机带动的容积式单向齿轮泵, 采用 PWM 方式控制油泵的供油量, 其供油稳定性及线性度对控制性能影响很大, 实验前对其进行仔细标定, 并采取软件修正措施。

(3) 将充油过程提前到点火前。为了使燃油尽快到达发动机, 在正常供油前首先发出供油尖脉冲,

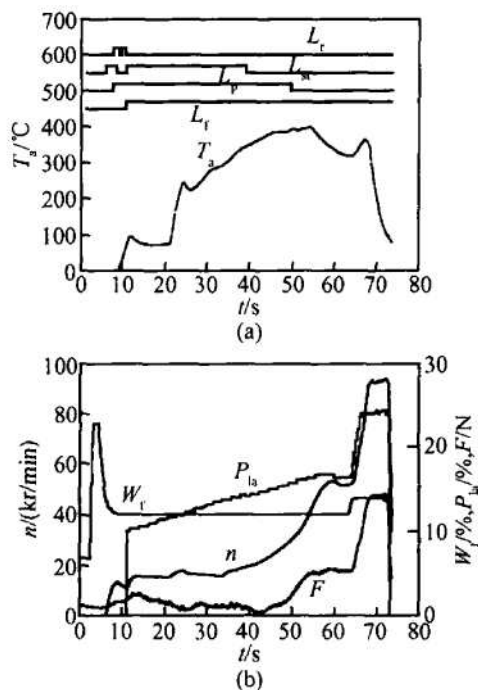


Fig 7 Result of tested experiment based on original ECU

将可能造成供油量偏大而富油悬挂。若将充油过程提前到点火前, 这样能大大减少对起动过程正常供油的影响。

(4) 采用自动供油自校正技术以获得最佳起动供油曲线。试验中发现, 在起动阶段, 尤其在起动电机关闭之前, 燃烧室内的燃烧条件十分恶劣, 发动机供油量的少量变化将导致点火条件变化较大, 极易导致发动机长时间处于“热悬挂”状态, 或者因能量提供不足而熄火^[8,9], 因此提供准确的供油曲线成为起动控制的关键。然而, 许多不确定的试验条件, 如微型油滤的通堵程度、微型齿轮泵进口油压、油料中滑油含量等等, 均影响实际供油大小, 造成实际供油曲线与理论曲线的偏离。

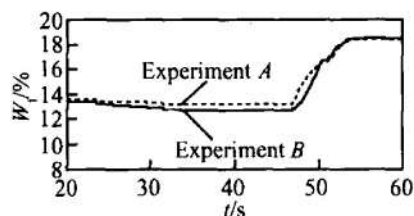


Fig 8 Self-turning fuel supply in starting

本文提出的起动供油自校正技术在起动供油计划曲线基础上根据转子转速变化率 $\dot{n}$ 来修正实际供油量, 消除试验条件差异带来的影响。起动供油初期为了保证可靠点火, 供油量一般都富余, 易造成转速悬挂。此时判断若 $\dot{n} < E_1$, 则供油量 w_f 按照一定速

率递减,直到 $\dot{n} > E_1$, 这里 E_1 为阈值。此时意味着已经达到合适的 w_f , 摆脱了富油状态, 转速上升加快, 由于空气流量的增加而使油气比迅速下降, 使发动机趋向“贫油”, 此时若 $\dot{n} < E_2$, 则 w_f 递增, 直到进入慢车状态。阈值 E_1 和 E_2 的大小由实验经验获得, 保证发动机不超温、不熄火, 平稳地过渡到慢车。起动阶段自校正供油方式见图 8, A、B 为两组成功起动的起动供油曲线。从图中可以看出, 由于两次试验条件存在着差异, 虽然初始供油一致, 但经自校正供油过程之后二者供油曲线有所不同。

(5) 为了保持发动机运行过程中的转速稳定, 慢车以上控制采用转速闭环控制方案。

4.3 基于工控机的快速原型机台架试验

为了研究和验证自主设计的 FADEC 系统的控制规律, 本文提出采用快速原型机实现方法, 即利用工控机和输入/输出接口卡, 代替图 1 中的 ECU, 并配以相应的接口端子板、驱动电路板、传感器板及执行机构, 输出指令信号并实时采集发动机的状态信息。快速原型机方法能方便地改进和完善微型涡轮发动机的控制规律和控制算法。

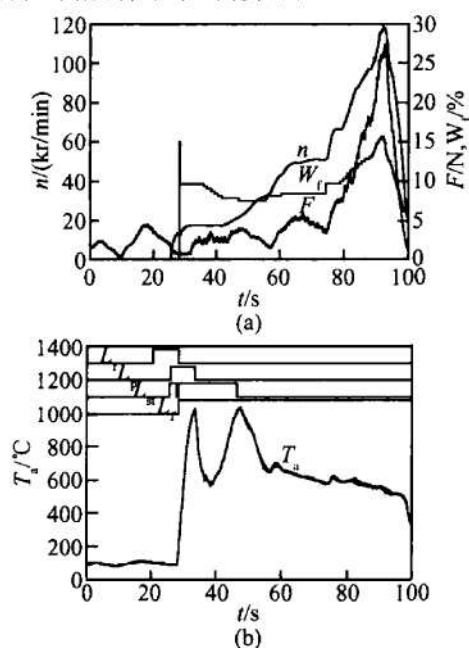


Fig 9 Result of tested experiment based on fast prototype controller

图 9 为快速原型机台架试验结果。试验成功地将转速推到慢车以上。转速在 80s 时上升到 60kr/min 以上, 然后减小供油量, 使转速降至 30kr/min 左右停车。尾气温度在点火成功后迅速升至 900°C 左右, 当气阀关闭, 燃油做功后, 尾气温度下将到 500~700°C。

试验结果表明, 对于微型涡轮发动机的自动控制, 将气阀关闭的时机调整在转速 25~30kr/min。供油指令调整在 11%~15% 之间均匀上升, 能有效地加快起动过程。起动供油自校正方式, 消除了试验条件变化带来的影响, 解决了发动机长时间“热悬挂”与停车熄火问题, 能确保发动机可靠起动。

在半物理仿真和基于原配电子控制器的台架实验得到的控制规律的基础上, 对控制规律进行了优化和台架试验验证, 使发动机能更可靠、快速地起动, 安全地工作。最终得到的控制规律将用于该微型涡轮发动机电子控制器中。

5 结 论

利用半物理仿真结合台架试验, 采用快速原型机的方法改进和完善了微型涡轮发动机的整套控制规律, 为下一步 FADEC 控制器的研究奠定了基础。本文提出的方法可以减少大量的实物台架试验, 并对于如超温、超速等实物难以模拟的试验环境下控制规律的获得, 提供了一条捷径。

参考文献:

- [1] 曹 谦. 微发控制规律及原理样机研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005
- [2] Chigier N, Genchi T. A review of micro propulsion technology [R]. AIAA 2003-670
- [3] Epstein A H. Millimeter-scale MEMS gas turbine engines [R]. ASME GT-2003-38866.
- [4] Gerendas M, Pfister R. Development of a very small aero-engine [R]. ASME 2000-GT-0536
- [5] 王荣瑚, 赵阳旭. 高科技与微型涡轮发动机的研制 [J]. 推进技术, 1997, 18(4). (WANG Mo-hu, ZHAO Yang-xu. Advanced technique and development in micro-turbo engines [J]. Journal of Propulsion Technology, 1997, 18(4).)
- [6] 黄国平, 温 泉, 李 博, 等. 微型涡喷发动机顶层设计研究 [J]. 航空动力学报, 2003, 18(6): 832~838
- [7] 张大中. 对燃气轮机运行中出现热悬挂的剖析 [J]. 热能动力工程, 1991, 6(5).
- [8] 刘振德, 陈玉春, 蔡元虎, 等. 简单控制规律下涡喷发动机特性的研究 [J]. 推进技术, 2002, 22(6). (LIU Zhen-de, CHEN Yu-chun, CAI Yuan-hu et al. Research on characteristics of turbojet engine with simple control program [J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 22(6).)
- [9] 皮 星, 邓文革. 某微型涡轮发动机数控系统研制 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2003, 16(4): 6~8

(编辑: 张奕春)