

文章编号: 1000-8055(2007)03-0480-05

厘米级微型涡轮喷气发动机关键 控制技术研究

刘 源¹, 黄向华², 张天宏²

(1. 中国航空动力控制系统研究所, 无锡 214063;
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 结合厘米级微型涡轮喷气发动机自身特点, 从工程角度研究其关键控制技术. 首先运用相似理论, 将参考发动机的起动控制时序变换适用于目标发动机的起动控制, 为了解决微型发动机起动困难问题还首次提出起动供油自校正技术. 慢车以上状态采用系统辨识法建模, 通过仿真结合试验的方法设计了带可自动调整前馈的闭环 PI 调节器. 试车试验表明, 研究的控制规律能控制发动机正常可靠运转, 满足各项性能指标要求.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 微型涡轮喷气发动机; 相似理论; 供油自校正; 系统辨识
中图分类号: V233.7 **文献标识码:** A

Research on key control technology of micro turbine engine in centimeter size

LIU Yuan¹, HUANG Xiang-hua², ZHANG Tian-hong²

(1. China Aviation Motor Control Institute, Wuxi 214063, China;
2. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Key control technology of micro turbine engine (MTE) in centimeter size was studied for engineering applications, based on MTE's characteristics. The starting control was firstly transformed for the targeted engine with reference to the starting control time sequence of MTE. The self-revised fuel supply technology was proposed for the first time in order to solve the startup problem of MTE. After the idle state, MTE's model was established by means of system identification, and a closed-loop PI with self-adjust feedforward was designed through simulation and experiments. The test run of MTE demonstrates that the control rules can ensure normal and reliable operation of MTE while meeting the requirements of performance indicators.

Key words: aerospace propulsion system; micro turbine engine; similarity theory; self-revised fuel supply; system identification; self-adjust feedforward

近年来, 随着新技术、新材料以及微加工工艺的突飞猛进, 航空燃气发动机出现了微型化分支.

微型涡轮喷气发动机的研究 (Micro Turbine Engine, MTE) 在许多航空技术发达国家发展十分

收稿日期: 2006-03-20; 修订日期: 2006-11-03

基金项目: 国防科研基金重大项目

作者简介: 刘源 (1981-) 男, 湖南省涟源市人, 南京航空航天大学硕士, 研究方向航空发动机控制, 飞行/推进一体化控制.

迅速,已运用于军事民用等领域,国内相关研究也在逐步展开.一般认为,MTE 是现代飞机动力装置的缩微版,具有与常规涡喷发动机相似的工作过程与运行特征^[1-5].但是,一方面部件的微型化与结构上的简化,使得控制变量与执行机构减少,控制系统相对而言较为简单,另一方面,微型化使得发动机响应更加迅速,点火更加困难,对扰动更加敏感等等,这些都增加了控制难度.

在研厘米级 MTE 为单转子结构,单级离心式压气机,外径约 11 cm,有起动电机、点火器、丙烷阀、燃油阀与微型燃油齿轮泵等执行机构,使用含 5 %滑油的航空煤油^[6].根据 MTE 微型化的特点,本文按照与传统发动机迥异的设计方法,研究出适合 MTE 的控制规律,包括独特的起动控制与闭环调节,最后介绍了 MTE 测控信号的滤波技术,以保证控制的可靠性.

1 起动控制

MTE 的起动过程一般为:启动电机,依次接通点火器、丙烷阀与燃油阀,丙烷点燃促使燃油蒸发,燃气混合后使燃烧更加充分,推动转子转速持续上升,最终到达慢车状态.与常规燃气发动机起动过程相比,MTE 的流场微小,燃烧困难,对燃油量变化敏感,这就要求非常准确地掌握各种起动条件.

1.1 相似理论应用

MTE 起动条件苛刻的特点,使得单纯依靠试验手段获取起动控制规律不仅代价高、进展慢,而且依赖研究人员经验,困难较大.为此,首先在起动控制时序的研究方面,本文应用了相似理论,将几何相似的参考 MTE 起动控制时序变换适用于目标 MTE 起动控制,大大提高了研究效率.

几何相似、尺寸不同的燃气发动机,保证进口气流马赫数 Ma_i 与气流在转子平均半径处切向马赫数 Ma_{ul} 不变可认为近似相似.当大气条件不变时,有以下相似关系^[7-8]:

$$\frac{n_a D_a}{\sqrt{T_{1^*}}} = \frac{n_b D_b}{\sqrt{T_{1^*}}} \Rightarrow \frac{n_a}{n_b} = \frac{D_b}{D_a} = \text{常数} \quad (1)$$

其中 n 为转子转速, D 为压气机进口内径, T_{1^*} 为压气机进口总温,尺寸不同发动机分别以下标“a”及“b”表示.

以国外 Simjet1200 为参考样机,外径 8.9 cm,结构与在研 MTE 基本相同.通过对 Simjet1200 起动控制分析,获得参考样机的起动控制时序.本文认为,当向参考 MTE 发出控制指令

时,应当对处于相似工作状态的目标 MTE 发出同样指令.例如,已知参考 MTE 的转子转速 3 000 r/min 以上为点火适宜条件,其丙烷阀在转子转速为 3 000 r/min 时打开,根据式(1),目标 MTE 在转子转速 2 400 r/min 以后处于相似的点火适宜状态,此时应打开丙烷阀,试验也验证了其合理性.依据式(1),建立起参考与目标 MTE 之间控制时序的一个近似转换关系,通过试验进一步完善,设计出合理的 MTE 起动控制时序,减少了资金投入与研究时间.

表 1 表述了参考与目标 MTE 部分控制时序中的转子转速对比情况,下标 a 代表参考 MTE,b 代表目标 MTE,它们的比值均基本等于两台发动机外径之比,近似等于 D_a/D_b .

表 1 参考与目标微型涡轮喷气发动机相同状态时的
转子转速对比

Table 1 Contrast between reference MTE's rotating speed
and target MTE's in same states

转速/(r/min)	开丙烷阀	关电机	慢车	转速限制
n_a	3 000	21 000	约 48 000	155 000
n_b	2 400	16 000	约 38 000	120 000

1.2 起动供油自校正

根据经验,常规燃气机起动供油一般采用开环控制.而 MTE 对起动供油量的要求较苛刻,因试验环境改变,MTE 起动油量经常出现偏差,采用单一的起动供油规律,经常使 MTE 熄火或者出现“热悬挂”,以及起动后期转速上升缓慢等现象.针对这一问题,本文采用了起动供油自校正技术.

由上述试验现象得知,起动油量偏差均导致转子转速变化不正常,因而可以按照转子转速变化率来修正实际供油量,以消除供油偏差带来的影响.具体做法如下:起动初期供油量因点火需要处于富余状态,需适当调小,因此在电机关闭之前,判断转子转速增长速率 dn 是否小于某个阈值 E_1 ,小于则供油量 w_f 按照一定速率递减,直至转子转速增长速率 dn 大于 E_1 ,意味着当前供油量 w_f 较合适.而电机关闭之后转速的持续上升,导致油气比迅速下降而使发动机趋向贫油,此时判断转速增长率 dn 是否小于某个阈值 E_2 ,小于则供油量 w_f 按照一定速率递增. E_1 、 E_2 的大小由试验确定,确保发动机不超温、不熄火,平稳地过渡到慢车.

起动阶段的供油自校正如图 1 所示, A、B 为两组真实试验起动阶段的供油曲线, 均在电机关闭前后自动减油与加油, 增减的幅度与转速上升率有关. A、B 虽然初始供油一致, 但经自校正供油过程之后二者的慢车供油量并不相等. MTE 点火试验表明, 起动供油自校正技术的采用, 消除了 MTE 起动油量偏差带来的影响, 解决了发动机长时间“热悬挂”与贫油问题, 保证起动一次成功.

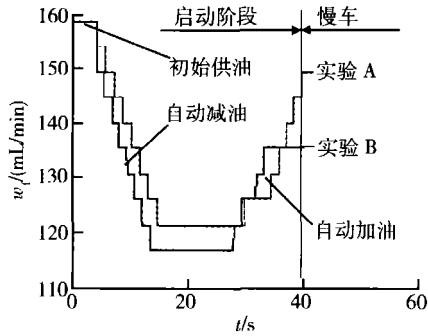


图 1 起动阶段自校正供油
Fig. 1 Self-revised fuel supply in starting

2 闭环控制

2.1 PI 控制器设计

MTE 可以由式 (2) 的二阶数学模型近似表示:

$$G(s) = \frac{\delta_n(s)}{\delta_{w_f}(s)} = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-\tau} \quad (2)$$

系统模型通过阶跃响应法辨识得出^[9-10], 发动机转速在 40 000~120 000 r/min 之间每隔 10 000 r/min 选取一个工作点, 均利用阶跃响应, 由两点法求出各工作点的模型参数 K, T_1, T_2, τ . 以某点为例, 图 2 描述了真实发动机与数学模型在转速 61 000 r/min 左右的阶跃响应对比, 从中可以看出模型的动静态响应与真实发动机大体上一致.

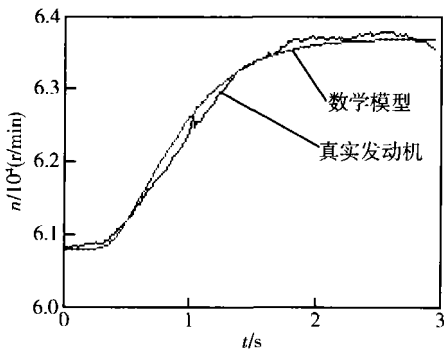


图 2 转速阶跃响应
Fig. 2 Step response of rotating speed

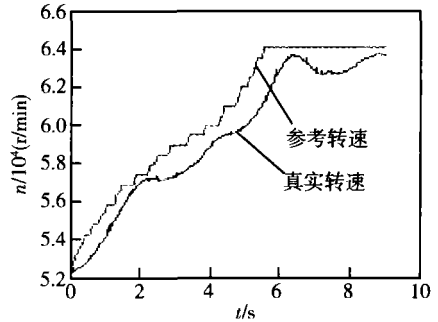


图 3 PI 控制下的转速响应
Fig. 3 Response of rotating speed under PI control

PI 参数整定采用试凑法, 通过 Simulink 系统建模与仿真, 确定合适参数, 最后在仿真试验基础上进行试车, 根据试车情况适当补充积分分离与积分限制等措施. 该设计思路不仅减少了实验成本, 而且确保实验中 MTE 运行可靠. 图 3 显示了试车实验加速过程的初步控制效果.

2.2 可自动调整前馈

为适应 MTE 响应速度较快, 同时避免积分饱和, 在 PI 控制器基础上增加前馈环节. 前馈环节根据参考转速 n_r 插值输出前馈控制量, 与 PI 控制器输出进行叠加, 得到总的供油量. 针对真实试验中的供油偏差, 设计的前馈环节可自动调整大小.

由图 1 得知, 不同试验中慢车供油量均存在差异, 因此固定的前馈环节易出现较大误差, 为此设计的前馈环节可根据供油误差自动调整大小. 可自动调整前馈原理如图 4 所示, 先确定一条标准前馈供油曲线 G_0 , 当发动机出慢车状态, 如果此时刻供油量与标准前馈量之间存在差值 e , 则慢车以后的前馈环节均在标准前馈基础上补偿 e , 使得前馈供油线由标准 G_0 整体移动到 G_1 , 因此 n 次试验就有 n 个前馈 G_n , 以消除供油误差带来的影响.

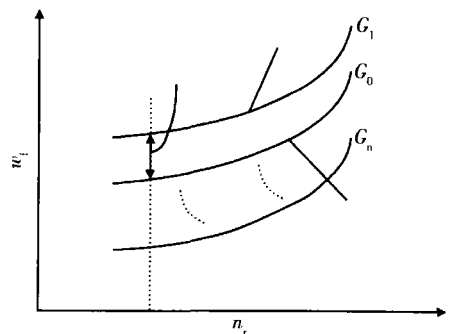


图 4 自动调节前馈原理
Fig. 4 Principle of self-adjust feedforward

图 5 显示了加速过程带可自动调整前馈的 PI 控制效果,与图 2 的 PI 控制对比可明显看出,发动机响应更加迅速,动态特性和稳态精度均得到提高。

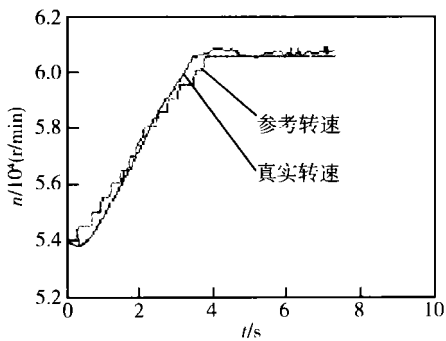


图 5 带可调前馈的 PI 控制下的转速响应
Fig. 5 Response of rotating speed under PI control combined with a self-adjust feed-forward

3 测控信号滤波

为了使控制系统能在较复杂环境下安全、可靠运行,对测控信号采取了以下滤波措施:

- (1) 开关测量信号,如手动、紧停开关等,均采用数字滤波,重复采集 2~3 次。
- (2) 模拟测量信号,如尾气温度与油门杆角度等,均采用惯性滤波。
- (3) 转速频率信号,采用极值滤波与斜率滤波结合的方法:当测量转速超出转速变化范围,认为此次采集存在干扰而直接过滤;当测量的转速变化率超过物理机械原理可能的最大变化率时,转速按照最大变化率变化。

以转速滤波为例,图 6 描述了某试验存在强烈电子干扰(电子打火)情况下的转速测量,可以看出滤波前的转速信号存在较大干扰,许多时刻

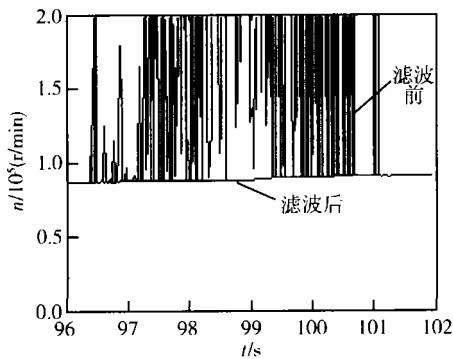


图 6 转速滤波前后比较
Fig. 6 Comparing with rotating speed curve before filtered and after

的转速值已经超出转速变化范围而直接过滤,一些小毛刺因其变化速率超出了机械原理可能的最大变化率,此时刻转速以最大变化速率变化,经过处理,干扰明显消除。

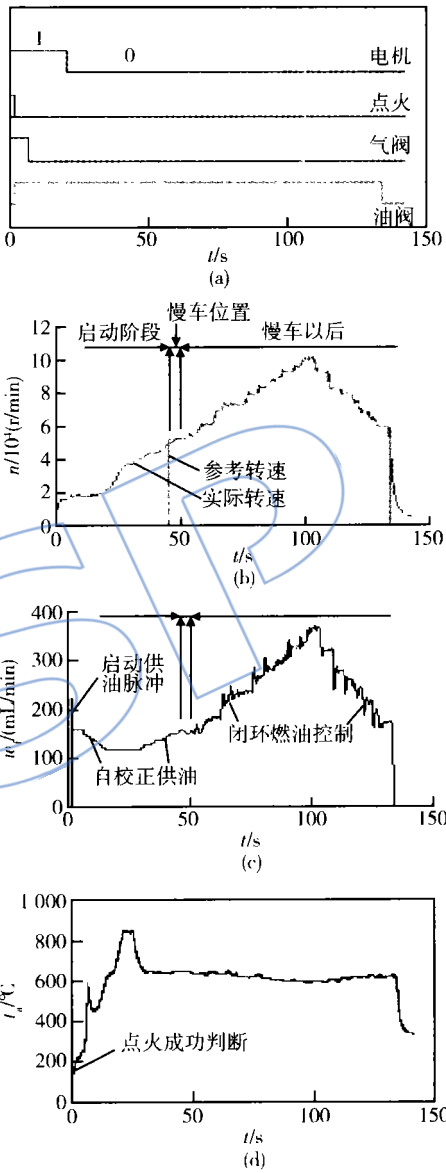


图 7 试车实验数据曲线
Fig. 7 The MTE's test data

4 试验分析

为验证控制方案可行,通过试车试验加以检验。MTE 试车台以工控机控制,信号采集与指令输出均通过基于 PCI 总线的多功能板卡。

图 7 表示试车试验曲线,以油门杆发出开车指令开始,到油门杆发出停车指令结束。按照图 7 (a) 所示时序(图中 1 代表开,0 代表关),MTE 首先由起动电机带动冷转动,转子转速 2 400 r/min

时打开丙烷阀点火,尾气温度超过 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 点火成功,关闭点火器,同时给出供油脉冲,以迅速启动微型燃油齿轮泵,5 s 后关闭丙烷阀,随后按照自校正供油方式到达慢车状态,慢车以后为带可自动调整前馈的 PI 闭环控制,起动过程耗时约 45 s,最大转速 $100\ 000\text{ r/min}$ 以上,稳态误差不超过 0.5%,动态误差不超过 5%,并且通过一系列滤波措施,消除了对测控信号的各种干扰。

5 结 论

在 MTE 起动控制研究中,利用相似原理,将参考 MTE 起动控制时序转换适用于目标 MTE,提高了研究效率,并采用起动供油自校正技术,以解决 MTE 起动经常失败的技术难题。

闭环控制为带可自动调整前馈的 PI 调节方式,利用系统辨识法建模,通过仿真结合试验的方式设计 PI 控制器,可自动调整前馈环节的采用,加快了响应速度,避免了积分饱和,同时可根据慢车供油差异自动调整标准前馈环节,以保证前馈量大小合适。

试车试验表明,所建立的调节计划能控制 MTE 正常运转,发动机点火正常,起动停车与长时间“热悬挂”的问题得到解决,闭环控制动静态指标均满足设计要求。

参考文献:

[1] Epstein A H. Micro turbo machinery (Gas turbine engine)

[P]. US PATENT:5,932,940.

- [2] Epstein A H, Breuer K S, Lang J H, et al. Micro gas turbine generators [M]. Massachusetts Inst. Of Tech., Cambridge, Gas Turbine Lab, Final Report. 1 May 1995-31 Jul 2000.
- [3] Doty F D, Miller B L, Hosford G S, et al. Hight-efficiency microturbine technology [A]. Proceedings, IECEC '91 [C]. Boston, 1991, 2: 436-442.
- [4] Wegeng R S, Drost M K. Developing new miniature energy systems [J]. Mechanical Engineering, 1994, 116 (9): 82-85.
- [5] 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.
HUANG Guoping, WNE Quan, LI Bo, et al. Top level design of micro-turbine jet engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18 (6): 832-838.
- [6] 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 [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17 (2): 9-13.
- [7] 尚义编著. 航空燃气涡轮发动机原理 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1995.
- [8] 邹滋祥. 相似理论在叶轮机机械模型研究中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [9] 樊思齐, 徐芸华. 航空推进系统控制 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- [10] 孙健国. 现代航空动力装置控制 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.