

# 单轴混排微型涡扇发动机低转速动力学建模

徐庆威, 王立峰

北方工业大学现场总线技术及自动化实验室, 北京

收稿日期: 2022年10月27日; 录用日期: 2023年1月3日; 发布日期: 2023年1月11日

---

## 摘要

本文描述向心涡轮驱动的单轴混排微型涡扇发动机从起动到慢车的低转速动力学模型及动态仿真, 以适应发动机电子控制器研制闭环仿真需求。通过风扇、压气机和涡轮低转速线特性扩展, 流道总压损失模型、混合器总压平衡、转子动力学等模型修正, 仿真结果表明模型能够涵盖发动机从电机起动、喷油点火、加速慢车的动态过程。

## 关键词

微型涡轮风扇发动机, 动力学建模, 低转速特性, 低转速建模

---

## Low Speed Dynamic Model on Singed-Shaft Mixed Exhaust Micro Turbofan Engine

Qingwei Xu, Lifeng Wang

Field Bus Technology & Automation Lab, North China University of Technology, Beijing

Received: Oct. 27<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2023; published: Jan. 11<sup>th</sup>, 2023

---

## Abstract

To adapt to closed-loop simulation requirements of electronic control unit research, dynamic modeling and simulation from starter to idle on singled-shaft mixed exhaust micro turbofan engine which is driven by centripetal turbine is described. Fan, compressor and turbine characteristics map is extended to low corrected speed, modeling of pressure loss in duct, pressure balance in mixer ex-

haust, rotor dynamic is updated. The simulation results show that modeling can overlay the dynamic process from starter, ignition and idle.

## Keywords

Micro Turbofan Engine, Dynamic Modeling, Low Corrected Speed Map, Low Speed Modeling

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

无人机, 巡飞弹、飞行背包等飞行器, 多数以涡轮风扇或涡轮喷气发动机作为飞行动力。微型涡喷机的推力一般在 200 kg 以下, 小型涡喷机推力在 200~900 kg 之间。小型涡扇发动机主要作为无人侦察机(常指高空长航时无人机)、小型无人作战飞机和亚声速远程(1000 km 以上)巡航导弹的动力[1] [2]。目前市场上的微型涡喷机多数使用 1 级轴流涡轮驱动, 其做功能力限制了发动机总压比, 因此 2 级压气机增压的微型涡轮风扇发动机非常少见。涡轮按照结构形式, 可分为轴流涡轮和向心涡轮, 其中轴流涡轮适合设计多级涡轮设计, 整体效率高, 但 1 级落压比最高 2.4 左右; 而向心涡轮一般为 1 级, 落压比最高可达 3.0 左右, 结构简单, 造价低廉, 多数用在汽车涡轮增压器和飞机辅助动力装置上, 适合微型或小型涡喷发动机[3] [4]。

微型涡扇发动机电子控制器研制过程中, 需要闭环仿真用于模拟电机起动、喷油点火、点火成功、慢车、加减速等动态过程, 因此低转速动态过程建模成为关键技术之一[5] [6] [7] [8] [9]。

微型涡喷发动机很常见, 但未见有微型涡扇发动机类型。本文研究的单轴混排微型涡轮风扇发动机主要用于像真航模、喷气背包、喷气动力靶机等飞行器上, 目标 120 kg 推力目标, 基本要求成本低廉, 耗油率低, 寿命长, 使用方便。

从制造成本角度考虑, 选用 1 级向心涡轮单轴驱动 1 级离心风扇和 1 级离心压气机。气流经过 1 级离心风扇(低压比离心压气机)增压后, 气流分 2 股气流, 即外涵道和内涵道, 内涵道气流继续经过 1 级离心压气机增压, 然后进入燃烧室, 喷油燃烧, 热燃气进入 1 级向心涡轮膨胀做功, 驱动离心压气机和离心风扇转动做功, 经过膨胀的燃气进入内外涵道混合器与外涵道的气流掺混, 降温的气流进入收敛喷口, 产生推力。参见图 1, 其主要特点: 单转子(单轴), 1 级离心风扇, 1 级离心压气机, 1 级离心涡轮, 内涵道外涵道气流混合排气, 这种结构形式有别于目前市场上的涡轮喷气发动机, 后者采用 1 级轴流涡轮和 1 级离心压气机。

## 2. 动力学建模

涡扇发动机动力学建模遵循转子功率平衡、站位流量相等、混合器压力相等的部件之间约束条件。参见图 2, 单轴混排微型涡轮风扇发动机部件及站位示意图, 图 2 中的部件, Inlet——进气道, Fan——风扇, comp——压气机, Pburn——燃烧室, Turb——涡轮, Mixer——混合器, Duct——外涵道, Nozz——收敛喷口, Rotor——转子 0, 2, 21, 22, 3, 4, 5, 51, 6 发动机横截面站位编号。

建立动态方程如下:

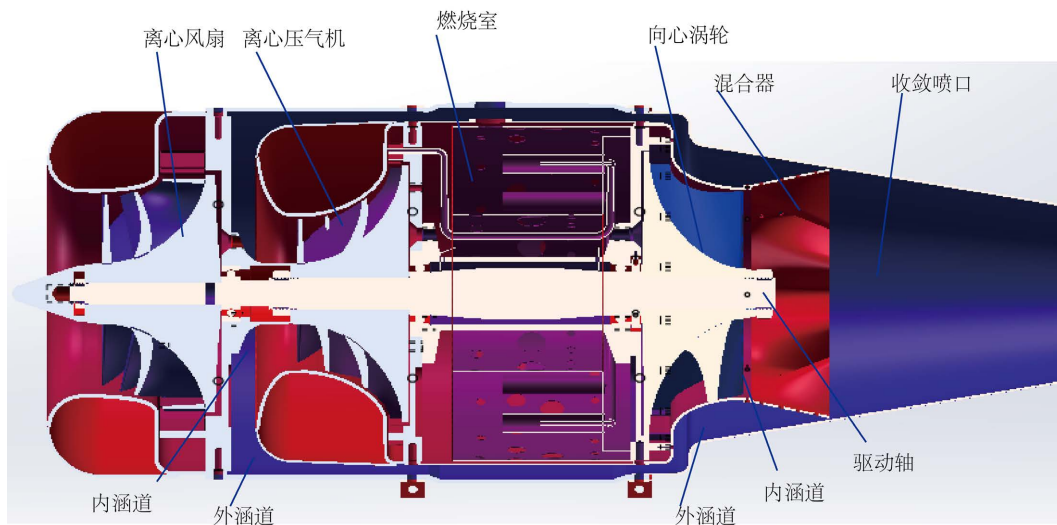


Figure 1. Structure schematic of single-shaft mixed exhaust micro turbofan engine  
图 1. 单轴混排微型涡轮风扇发动机横截面结构示意图

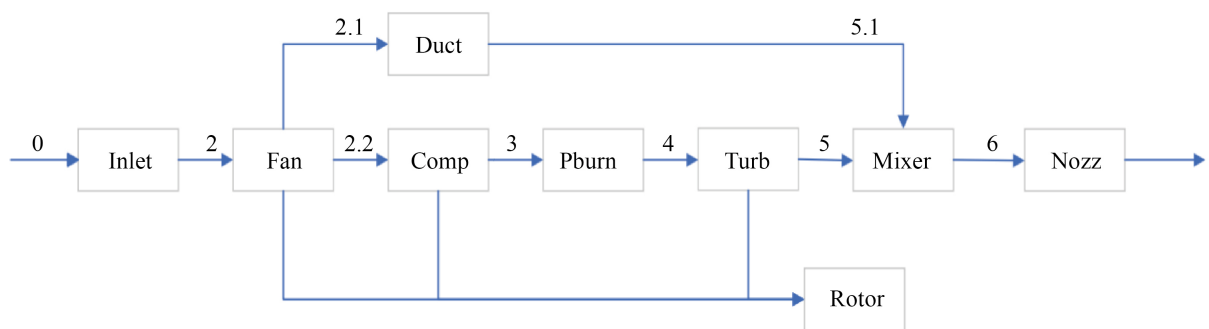


Figure 2. Flow station and component link schematic of single-shaft mixed exhaust micro turbofan engine  
图 2. 单轴混排微型涡轮风扇发动机部件关联及流路站位示意图

$$\begin{aligned}
 0 &= \dot{n}_r - (30/\pi)^2 (w_t + w_s - w_c - w_f) / (n_r n_d J) / n_d \\
 0 &= m_i - m_f \\
 0 &= m_f / (1 + bpr) - m_c \\
 0 &= m_c + m_u - m_t \\
 0 &= m_t + m_f bpr / (1 + bpr) - m_n \\
 0 &= (P_{51} - P_5) / P_{51}
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中,  $m$  为流量,  $P$  为压力,  $T$  为温度,  $bpr$  涵道比,  $\beta$  为压缩部件特性图的特性线,  $w$  为功,  $n$  代表转速,  $J$  代表转子转惯量,  $\pi$  代表圆周率; 下标:  $r$  代表与设计点相比的相对值,  $d$  代表设计点,  $i$  为进气道,  $f$  为风扇,  $c$  为压气机,  $t$  为涡轮,  $s$  为起动电机,  $x$  为混合器,  $n$  为喷口,  $u$  为燃油输入量。

公式(1)的导数项, 按隐式欧拉法展开, 有  $\dot{n}_r \approx (n_r(t+dt) - n_r(t)) / dt = (n_r - n_c) / dt$  其中  $n_c$  代表前一时刻  $t-dt$  之已知值,  $dt$  代表时间步长,  $x = [n_r, \beta_i, \beta_f, \beta_c, \beta_t, bpr]$ ,  $u = m_u$ , 则方程(1)可改写为:

$$0 = F(x, u) \tag{2}$$

发动机动力学方程(2)为非线性代数方程组, 可通过 newton-raphson 方法求解。

### 3. 低转速建模修正

发动机起动、点火、慢车动态过程中, 处于低转速状态, 一般在 10%~55%之间。动态方程(2)模拟求解过程中, 由于多个流道压力损失, 导致喷口总压小于喷口出口静压, 喷口流速不可求; 同时缺乏低转速部件特性数据, 且混合器压力很难平衡等问题, 因此扩展风扇、压气机和涡轮低转速线特性, 修正流道总压恢复模型, 更新混合器总压平衡、转子动力学等模型等手段, 来适应低转速模拟。

#### 3.1. 流道总压损失

包含外涵道, 燃烧室, 混合器等部件的总压损失。总压恢复系数定义如下:

$$\sigma = \frac{P_e - P_s}{P_i - P_s} \quad (3)$$

其中, 总压恢复系数  $\sigma$ , 下标  $e$  代表出口,  $s$  环境大气压力,  $i$  进口, 那么出口总压  $P_e = P_s + \sigma(P_i - P_s)$ , 即流道出口总压总是大于环境压力, 总是能求出喷口速度。

在发动机模型中, 总压恢复系数可视为常数或总压损失系数与流量系数成正比

$$\sigma = 1 - q(\lambda) / q(\lambda_d)(1 - \sigma_d) \quad (4)$$

其中流量系数  $q(\lambda)$ , 速度系数  $\lambda$ , 下标  $d$  代表设计点。

#### 3.2. 混合器总压平衡

风扇后部分气流, 流经外涵通道后直接进入混合器, 其压力恢复能够真实反映混合器的压力, 因此以外涵道出口压力作为比较指标, 故压力平衡方程更新为:

$$0 = (P_{s1} - P_s) / P_{s1}$$

#### 3.3. 转子部件功率平衡

由于起动电机与转子相连, 在起动时, 给转子提供起动功率, 因此转子轴功平衡方程应加以修正, 如下:

$$0 = \dot{n}_r - (30/\pi)^2 (w_i + w_s - w_c - w_f) / (n_r n_d J) / n_d$$

#### 3.4. 风扇特性扩展

发动机模型中, 风扇和压气机通用特性图, 缺少低转速特性。按泵的低转速特性不可压缩流相似理论, 结合可压缩效应指数修正, 去扩展部件低转速特性[10] [11]。特性图  $\beta$  特性线上的流量与转速成正比, 功与转速平方成正比, 效率随转速下降, 有:

$$\begin{aligned} m / m_{ref} &= n / n_{ref} \\ \eta / \eta_{ref} &= (n / n_{ref})^{1/3} \\ \left[ (1 - \pi^{(k-1)/k}) / \eta \right] / \left[ (1 - \pi_{ref}^{(k-1)/k}) / \eta_{ref} \right] &= (n / n_{ref})^2 \end{aligned}$$

下标  $ref$  代表参考点,  $n$  转速,  $m$  流量,  $\eta$  效率,  $\pi$  压比; 压气机低转速特性图扩展规律与风扇一致。

#### 3.5. 涡轮特性扩展

发动机模型中, 涡轮通用特性图缺少低转速特性, 因此参考风扇特性扩展, 但需要可压缩效应修正。修正方法如下:

$$m/m_{ref} = n/n_{ref}$$

$$\eta/\eta_{ref} = (n/n_{ref})^{0.0}$$

$$\left[ \left( 1 - (1/\pi)^{(k-1)/k} \right) \eta \right] / \left[ \left( 1 - (1/\pi_{ref})^{(k-1)/k} \right) \eta_{ref} \right] = (n/n_{ref})^{1.03}$$

下标  $ref$  代表参考点,  $n$  转速,  $m$  流量,  $\eta$  效率,  $\pi$  涡轮压比; 因离心涡轮效率在低转速下变化不大, 因此取指数为 0; 可压缩流修正, 涡轮功指数为 1.03。这些指数参数需要试验, 没有指导性意义。

#### 4. 起动、点火到慢车的低转速动态模拟

发动机电子控制器研制闭环仿真需求中, 发动机从电机起动、喷油点火、加速慢车的动态过程, 能够考核控制逻辑及加速到慢车控制回路参数的合理性, 及起动电机的功率多少、起动燃油流量等问题。

模拟条件: 发动机地面起动, 标准大气; 仿真时间持续 20 s, 参见图 3 电机起动、喷油点火、加速慢车的动态过程; 电机起动, 持续 2 s, 此时有喷油但没点火, 排气温度很低; 喷油点火, 持续 2 s, 此时起动电机继续工作输出功率给转轴, 燃油燃烧, 排气温度提高到 500 K 左右; 关闭起动电机, 电机不再输出功率给转轴, 持续 0.6 s, 转速略微下降, 排气温度变化不大; 慢车指令起动, 加速过程需要期望值转速与实际转速之差的油量供应模型, 加速到慢车相对转速 0.55, 约 6~7 s 进入到慢车转速, 稳定在 0.55 转速条件持续 7 s 仿真结束。

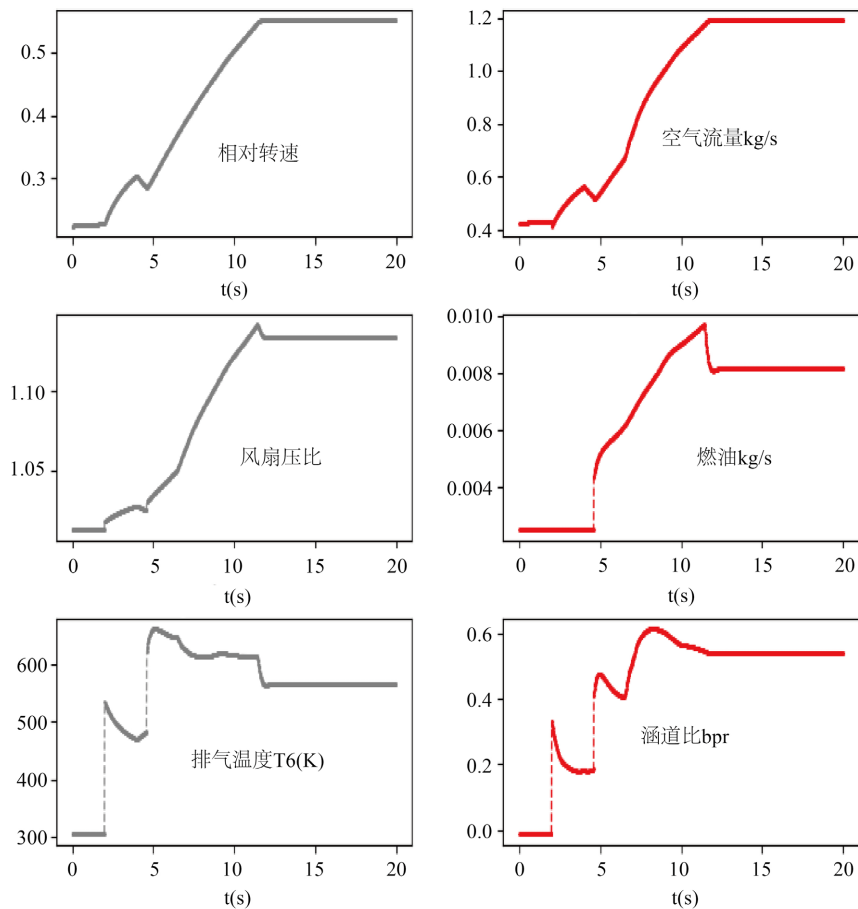
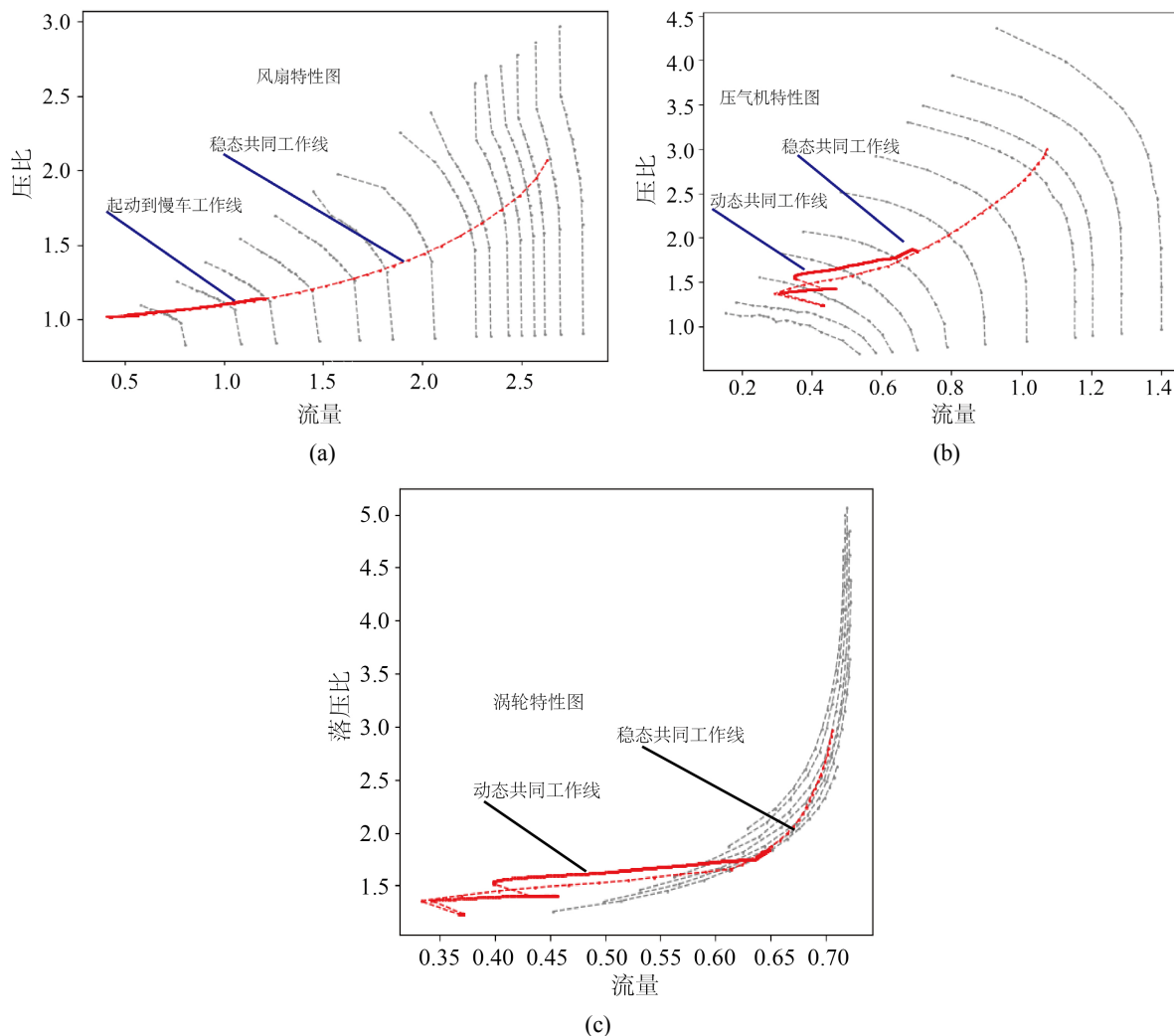


Figure 3. Dynamic process of engine's from start, ignition, idle, acceleration  
图 3. 电机起动、喷油点火、加速慢车的动态过程

发动机从电机起动、喷油点火、加速慢车的动态过程中, 风扇与涡轮共同工作线, 压气机与涡轮共同工作线, 涡轮与压气机、风扇共同工作线分别参见图 4(a)~(c), 图上也注明了稳态共同工作线, 动态工作线在起动期间动态过程。



**Figure 4.** (a) fan and turbine cooperation line; (b) compressor and turbine cooperation line; (c) turbine and fan, compressor cooperation line

**图 4.** (a) 风扇与涡轮共同工作线; (b) 压气机与涡轮共同工作线; (c) 涡轮与风扇、压气机的涡轮特性图

## 5. 结论

为满足发动机电子控制器研制闭环仿真需求, 而研制的单轴混排微型涡扇发动机从起动到慢车的低转速动力学模型, 通过风扇、压气机和涡轮低转速线特性扩展, 流道总压损失模型、混合器总压平衡、转子动力学等模型修正, 能够良好模拟发动机从电机起动、喷油点火、加速慢车的动态过程。此期间起动电机的功率、起动燃油流量还需要仿真试验确定。

## 参考文献

- [1] 张鹏峰. 无人机/巡航导弹用小型涡扇发动机的发展[J]. 飞航导弹, 2012(8): 65-68+92.

<https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.2012.08.008>

- [2] 龙玉珍. 美国 F107 系列小型涡扇发动机[J]. 飞航导弹, 1993(6): 31-35.
- [3] 史家伟, 杜强, 朱俊强. 某小型涡扇发动机高压涡轮气动设计[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(6): 1068-1074.
- [4] 张伟昊, 邹正平, 刘火星, 李维. 小型涡扇发动机涡轮气动设计研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(1): 72-79.
- [5] Connolly, J.W., Csank, E., Chicatelli, A. and Franco, K. (2017) Propulsion Controls Modeling for a Small Turbofan Engine. *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, July 2017.
- [6] 苏志刚, 张凌霄, 邓甜. 小型涡扇发动机燃油控制规律[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12): 2555-2562.
- [7] 郑里鹭, 田钧, 龙飞, 王根辉. 基于滑模变结构的小型涡扇发动机加速控制[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(1): 19-23+27. <https://doi.org/10.19557/j.cnki.1001-9944.2021.01.005>
- [8] 田钧, 郑里鹭, 龙飞, 张猛. 基于动态补偿的小型涡扇发动机滑模控制[J]. 自动化与仪表, 2020, 35(4): 11-15+24. <https://doi.org/10.19557/j.cnki.1001-9944.2020.04.003>
- [9] 王汉权. 小型涡扇发动机全状态实时数值仿真[J]. 战术导弹技术, 2014(2): 61-67.
- [10] 周通, 黄兴, 刘渊, 等. 某型压气机低转速特性扩展方法对比分析[J]. 航空发动机, 2018, 44(3): 65-70.
- [11] 王占学, 王永杰, 乔渭阳, 等. 涡扇发动机低转速部件特性扩展和风车状态性能模拟[J]. 推进技术, 2006, 27(2): 146-149.