

# 面向控制的 100 千瓦微型燃气轮机建模研究

林平 杜宪 马艳华 孙希明

(1.大连理工大学 大连 116024)

(联系电话 18941132118 E-mail dmulinping@126.com)

**摘要:** 本文建立了燃气轮机从起动到额定转速的模型, 提出分别基于数据驱动和机理方法建立起动模型和慢车转速以上模型, 并设计延迟切换模块实现了该型燃气轮机整个过程的模拟。其中起动模型采用变系数拟合法建立了燃机的转速模型; 了保证模型实时性, 采用容腔法建立了慢车转速以上的发动机非线性实时机理模型; 最后, 基于燃机实际台阶试车数据, 对燃机机理模型的压气机和涡轮特性线进行了修正, 使模型满足达到相应的精度要求, 为微型燃气轮机控制器设计及验证提供了平台和基础。

**关键词:** 微型燃气轮机; 非线性模型起; 动模型; 模型修正; 数据和机理结合方法

文中符号说明:

符号	含义	符号	含义
$G_c$	压气机进口换算流量	$\eta_c$	压气机等熵压缩效率值
$\pi_c$	压气机压比	$n/\sqrt{T_{cm}}$	压气机换算转速
$T_{cin}$	压气机进口温度	$n$	压气机转速
$m_c$	压气机质量流量	$c_p$	空气定压比热容
$k$	空气多变指数	$J$	发动机的转动惯量
$\omega$	发动机角速度	$M_{st}$	起动电机的输出转矩
$K_{st}$	起动电机转矩常数	$I_{st}$	起动电机电流
$M_{gas}$	微型燃机点火后的剩余转矩	$W_{fs}$	稳态燃料流量
$W_f$	动态燃料流量	$k(n)$	剩余转矩比例系数
$b(n)$	剩余转矩位移系数	$N_g$	燃机转速
$M_T$	涡轮输出转矩	$M_C$	压气机消耗转矩
$M_f$	摩擦损耗转矩	$T_2$	压气机出口温度
$K_T$	压气机出口的温度系数	$P_2$	压气机出口压力
$K_P$	压气机出口的压力系数	$P_{3C}$	燃烧室出口压力
$K_C$	燃烧室压力系数	$P_4$	涡轮出口压力
$k_{wp}$	涡轮出口压力系数	$T_4$	涡轮出口温度
$K_t$	涡轮出口温度系数	$N_{gt}$	燃机的额定转速
$N_{idle}$	燃机的慢车转速	$V$	燃烧室容积
$\eta_B$	燃烧室的燃烧效率	$G_{gout}$	燃烧室出口的燃气流量
$G_{gin}$	燃烧室进口的燃气流量	$G_f$	进入燃烧室的燃料流量
$h_{fin}$	进入燃烧室的燃料的比焐值	$h_{ain}$	燃烧室入口空气的比焐值
$h_{gout}$	燃烧室出口燃气的比焐值	$H_u$	燃料(天然气)燃烧的热值
$C_{pg}$	燃烧室内燃气的等压比热容	$P_{out}$	燃烧室出口压力
$P_{in}$	燃烧室进口压力	$K_b$	燃烧室压力损失系数
$G_T$	等熵膨胀时涡轮进口处的换算流量	$\eta_T$	涡轮等熵膨胀效率值
$\pi_T$	涡轮的落压比	$n/\sqrt{T_{rin}}$	涡轮换算转速
$m_T$	涡轮质量流量	$c_T$	燃气定压比热容
$T_{tin}$	涡轮进口温度	$K_T$	燃气多变指数
$R_M$	通用气体常数	$m_{gas}$	燃气平均摩尔质量
$N_l$	压气机与负载的总消耗功率	$N_c$	压气机消耗功率
$N_m$	外载荷(发电机、减速箱及摩擦)功率	$I_P$	对数压比
$n_{mol}$	燃气的摩尔数	$K_3$	稳态燃料量的三次系数

$K_2$	稳态燃料量的二次系数	$K_1$	稳态燃料量的一次系数
$b_0$	稳态燃料量的常数系数	$const$	涡轮出口压力常数项（一般取环境压力）
$H$	焓值	$S$	熵

## 1 引言

研制微小型燃气轮机控制器需要建立微小型燃气轮机的数学模型, 为开展微小型燃气轮机控制器的硬件在回路仿真、半物理仿真试验奠定基础, 同时也能检验所设计的控制器性能<sup>[1]</sup>。目前微小型燃气轮机慢车转速以上模型大多根据发动机工作过程所遵循的气动热力学规律和发动机部件特性数据的非线性模型, 目前常用的非线性模型求解方法有<sup>[2]</sup>: 牛顿--拉夫逊法、N+1 残量法等, 其中牛顿--拉夫逊法需要在迭代每一步中多次进行发动机部件特性迭代和雅可比矩阵的求解, 导致计算量大, 计算时间相对长, 难以满足控制用微小型燃气轮机模型的高实时性要求。而考虑容腔的质量和能量的储能效应, 建立容腔压力和温度的微分方程, 容腔的压力和温度就可以用不迭代的数值法求解<sup>[3]</sup>, 能保证微小型燃气轮机非线性模型的实时性。

所以本文针对 100 千瓦级微小型燃气轮机, 结合 MATLAB/Simulink 可视化程度高便于模型的修改和调整等特点, 不同于文献<sup>[4]</sup>采用牛顿—拉夫逊方法求解共同工作方程建立稳态模型和动态模型, 通过容腔法旨在建立一种控制用实时非线性微小型燃气轮机模型, 提出分别基于数据驱动和机理方法建立起动模型和慢车转速以上模型, 其中慢车转速以上模型采用容腔法, 并设计延迟切换模块实现了该型燃气轮机整个过程的模拟, 建立了微小型燃气轮机模型数字仿真平台。基于燃机实际台阶试车数据, 对机理模型燃机的压气机和涡轮特性线进行了修正, 达到了相应的模型精度要求, 能用于微小型燃气轮机控制器的早期测试。

## 2 模型搭建

本文研究的微型燃气轮机无压气机引气、不采用空冷涡轮叶片等, 所指的 100 千瓦微型燃气轮机简单循环非线性实时模型包括两部分, 起动模型和慢车转速以上的机理模型, 其中慢车转速以上模型主要包括四个部分, 分别是压气机、燃烧室、涡轮和转子部分。

### 2.1 起动模型

发动机起动过程是大偏差非线性的, 不存在稳态工作点, 发动机起动阶段的转动部件特性很难获得, 且建模过程比较复杂, 需要进行大量的假设、近似处理和反复的迭代运算。通过变系数拟合法建立了微型燃气涡轮发动机起动过程模型, 具体而言就是通过调整系数使模型的输出转速最大程度地接近试验转速, 再确定燃机的其他状态参数(压气机出口压力、压气机出口温度、燃烧室后压力、涡轮前压力、涡轮后温度、涡轮后压力)与燃机转速的对应关系。

#### 2.1.1 基于变系数拟合法的燃机转速模型

发动机的起动过程分为三个阶段, 第一阶段是电起动机单独带动燃机; 第二阶段点火成功后, 电起动机和燃气涡轮共同带动燃机运行; 第三阶段是电起动机脱开之后, 燃气涡轮单独带动燃机运行至慢车转速。

$$\text{第一阶段:} \quad J \frac{d\omega}{dt} = M_{st} \quad (1)$$

$$M_{st} = K_{st} \times I_{st} \quad (2)$$

第二阶段:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{st} + M_{gas} \quad (3)$$

$$M_{gas} = k(n) \times (W_f - W_{fss}) + b(n) \quad (4)$$

$$W_{fss} = K_3 \times N_g^3 + K_2 \times N_g^2 + K_1 \times N_g^1 + b_0 \quad (5)$$

第三阶段：

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{gas} \quad (6)$$

利用欧拉积分方法对公式(1)(3)(6)分别进行积分,得到该模型的微型燃气涡轮发动机转速,保证该微型燃气涡轮发动机的转速和试验数据中的燃机转速误差在5%以内,如果不满足此精度要求,调整其相应的系数。

### 2.1.2 基于燃机转速的燃机状态参数模型

微型燃气涡轮发动机的状态参数与燃气涡轮发动机转速之间的关系十分密切,此处提到的燃气涡轮发动机的状态参数主要包括:压气机出口温度、压气机出口压力、燃烧室出口压力、涡轮出口温度、涡轮出口压力五个参数,利用 MATLAB 自带的拟合工具拟合出燃气涡轮发动机的状态参数和燃气涡轮发动机转速的函数表达式,即:

$$T_2 = K_T \times N_g^2 \quad (7)$$

$$P_2 = K_P \times N_g^2 \quad (8)$$

$$P_{3C} = K_C \times N_g^2 \quad (9)$$

$$P_4 = const + K_{WP} \times N_g \quad (10)$$

$$T_4 = K_t \times N_g \quad (11)$$

将所得的燃气涡轮发动机状态参数和转速之间的多项式函数关系进行离散,即对公式(7)、(8)、(9)、(10)、(11)进行离散,为了保证离散精度,微型燃气涡轮发动机转速的步长值取为  $0.2\% \times N_{gt}$ ,将离散化处理后的数据放入相应的一维线性插值表。

### 2.1.3 模型验证

根据燃气涡轮发动机的试验数据,得到压气机出口压力、压气机出口温度、燃烧室出口压力、涡轮出口压力、涡轮出口温度、微型燃气涡轮发动机转速等参数与燃机起动模型输出参数之间的误差均在5%以内。图1-图6是所建立的起动模型的输出参数与试验数据的对比情况,图中蓝线表示试验数据,图中红线表示模型输出数据。

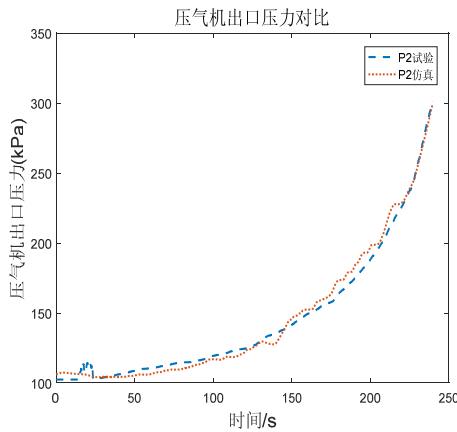


图1 压气机出口压力对比

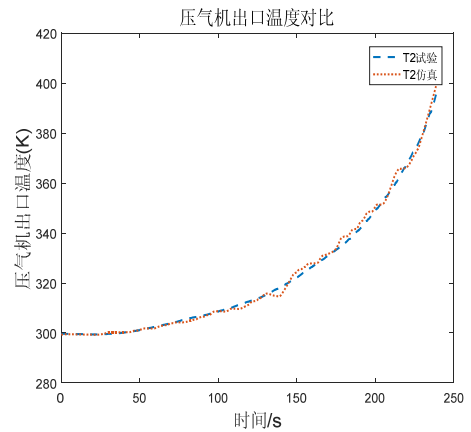


图2 压气机出口温度对比

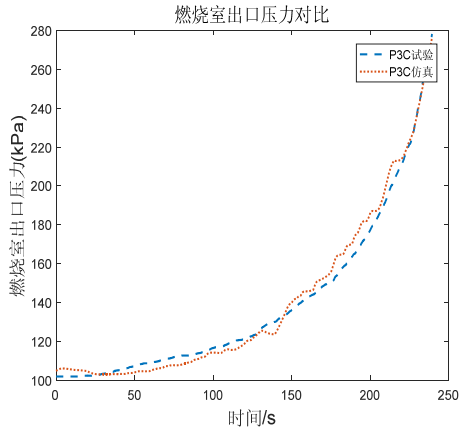


图 3 燃烧室出口压力对比

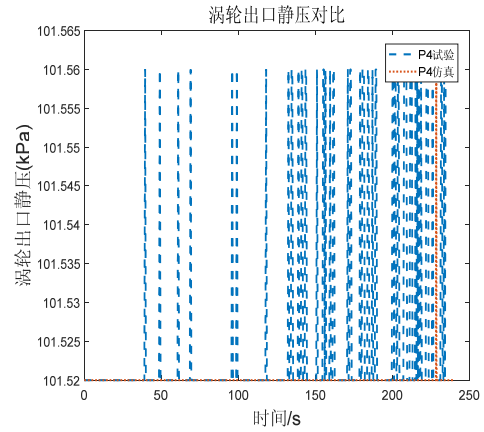


图 4 涡轮出口静压对比

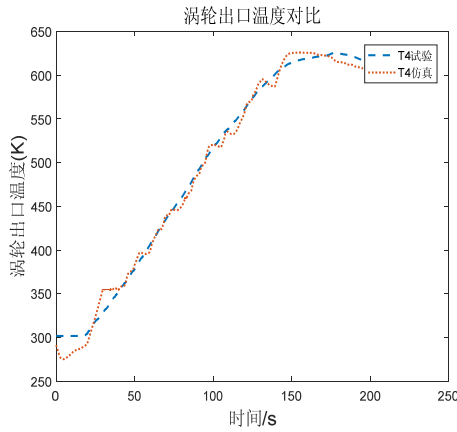


图 5 涡轮出口温度对比

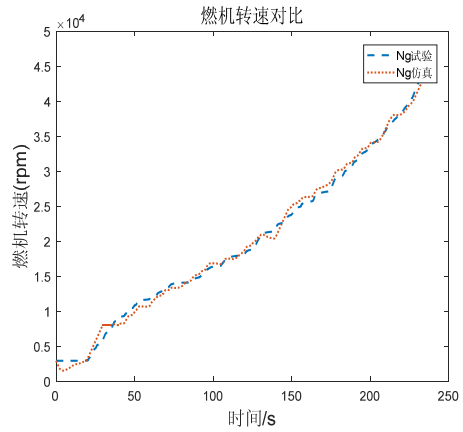


图 6 转速对比

## 2.2 慢车转速以上模型

慢车转速以上模型借助于压气机特性线和涡轮特性线等已知参数采用机理法建模,该部分模型主要由四部分组成,压气机模块、燃烧室模块、涡轮模块和转子模块等。

### 2.2.1 压气机

该型燃气轮机压气机采用单级离心式结构,压气机模块具有 4 个输入量,分别是压气机进口压力、压气机出口压力、压气机进口温度和压气机转速;3 个输出量,分别是压气机质量流量、压气机出口温度和压气机消耗功率。压气机特性参数一共有四个,分别是换算流量、效率、压比和换算转速,只要其中任意两个参数一经确定,那么压气机的工作状态也就确定。

$$G_c = f(\pi_c, n / \sqrt{T_{cin}}) \quad (12)$$

$$\eta_c = f(G_c, n / \sqrt{T_{cin}}) \quad (13)$$

$$P_c = m_c c_p T_{cin} (\pi_c^{(k-1)/k} - 1) / \eta_c \quad (14)$$

### 2.2.2 燃烧室

假定燃烧室的焓值和温度均匀分布,反映燃烧室动态变化过程关系主要是质量平衡方程和能量平衡方程:

$$\frac{dP_{out}}{dt} = \frac{R_g T_{out} (G_{ain} + G_f - G_{gout})}{V} + \frac{P_{out}}{T_{out}} \frac{dT_{out}}{dt} \quad (15)$$

$$\frac{dT_{out}}{dt} = \frac{R_g T_{out} \left[ k \left( G_{ain} h_{ain} + G_f h_{fin} + G_f H_u \eta_B - G_{gout} h_{gout} \right) - h_{gout} \left( G_{ain} + G_f - G_{gout} \right) \right]}{P_{out} C_{pg} V} \quad (16)$$

燃烧室的压力损失系数是燃烧室的另一个重要的性能参数,它与燃烧室的流动情况和燃烧室的温度有关,燃烧室压力损失一般变化不大,可以认为压力损失系数为恒定值。其表达关系式如下:

$$P_{out} = (1 - K_b) P_{in} \quad (17)$$

### 2.2.3 涡轮

该型燃气轮机涡轮采用两级轴流式结构,涡轮具有 5 个输入量,分别是涡轮进口压力、涡轮出口压力、涡轮进口温度、涡轮转速和油气比;4 个输出量,分别是涡轮质量流量、涡轮出口温度和涡轮产生功率。涡轮特性参数一共有四个,分别是换算流量、效率、落压比和换算转速,只要其中任意两个参数一经确定,那么涡轮的工作状态也就确定。

$$G_T = f(\pi_T, n / \sqrt{T_{in}}) \quad (18)$$

$$\eta_T = f(G_T, n / \sqrt{T_{in}}) \quad (19)$$

$$P_T = m_T c_T T_{in} (1 - \pi_T^{-(k_T-1)/k_T}) \times \eta_T \quad (20)$$

### 2.2.4 热力学计算

热力学计算主要针对压气机和涡轮,燃气组分的热力性质,主要根据分段定压比热容(或者焓值)数据来拟合关于温度的多项式<sup>[5]</sup>。其中根据实际情况和要求,可以选取温度的二阶至十阶多项式计算焓值。本项目采用八阶拟合多项式进行组分热力性质的计算<sup>[6]</sup>,具体如下:

$$H = A_h + \sum_{i=0}^8 a_{h,i} \cdot \left( \frac{T}{1000} \right)^i + b_h \cdot \ln \left( \frac{T}{1000} \right) \quad \text{kJ/kmol} \quad (21)$$

$$S = A_s + \sum_{i=1}^7 a_{s,i} \cdot \left( \frac{T}{1000} \right)^i + b_s \cdot \ln \left( \frac{T}{1000} \right) \quad \text{kJ/(kmol} \cdot \text{K)} \quad (22)$$

$$S = \int_{T_0}^T c_p \frac{dT}{T} \quad I_p = \ln \pi = \frac{S}{R_M} \quad (23)$$

燃气可看成是各组成气体按照理想气体混合的产物,因此,当确定燃气成分摩尔百分比以后便可由上式求解燃气性质。其中燃气各项常数可由各组分相应项的常数按混合规则进行求解。其中,焓公式中燃气各项常数为:

$$A_h = \sum_{j=1}^5 r_j \cdot A_{h,j} \quad a_{h,j} = \sum_{j=1}^5 r_j \cdot (a_{h,i})_j \quad b_h = \sum_{j=1}^5 r_j \cdot b_{h,j} \quad (24)$$

其中,熵公式中燃气各项常数为:

$$A_s = \sum_{j=1}^5 r_j \cdot A_{s,j} \quad a_{s,j} = \sum_{j=1}^5 r_j \cdot (a_{s,i})_j \quad b_s = \sum_{j=1}^5 r_j \cdot b_{s,j} \quad (25)$$

其中公式(21)、(22)、(23)、(24)、(25)中的系数详见文献[6]。上述燃气热力性质以摩尔量为基准,实际应用中需要转换为质量基准,以公式(26)为准。

$$m = \frac{n_{mol}}{m_{gas}} \quad (26)$$

通过上述公式,可以求得任意温度条件下的燃气热力性质(包括比焓、比熵和对数压比)。在实际计算中,经常遇到已知比焓或对数压比求解温度的问题,此时需要通过反复迭代求解,此处一般采用二分法进行计算。

### 2.2.5 转子模块

航空发动机/燃气轮机中稳态时一个重要的准则就是压气机及其负载与涡轮的功率平衡：

$$N_t - N_l = 0 \tag{27}$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} \frac{900}{\pi^2} \frac{1}{n} (N_t - N_l) \tag{28}$$

2.2.6 微型燃气轮机整体模型结构

微型燃气轮机整体模型结构如图 7 所示，分别由压气机、燃烧室、涡轮和转子模块组成。

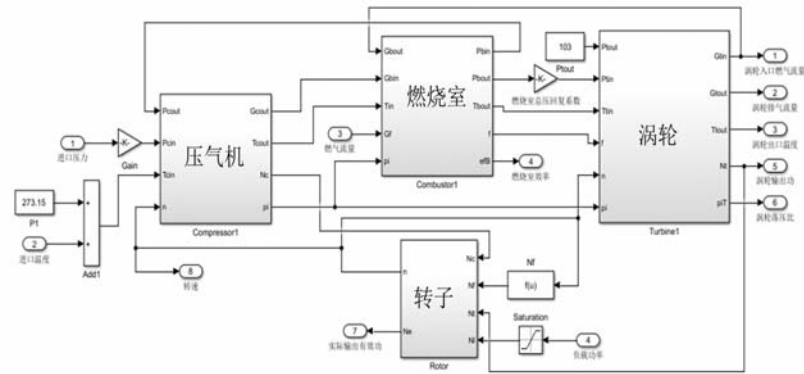


图 7 慢车转速以上发动机模型

2.2.7 模型验证

由于搭建的模型为理想状态下的发动机模型，需要借助试验数据对理想状态下的发动机模型进行修正，使模型的输入输出数据与试验数据的误差在允许的范围内。修正的系数主要包括压气机的换算流量系数、压气机的物理流量系数、压气机的效率系数、燃烧室的效率系数、燃烧室的压力损失系数、涡轮的换算流量系数、涡轮的物理流量系数和涡轮的效率系数。最后通过发动机压气机压比去调度相关的系数。

所以利用燃机加速过程的 7 组台阶试验数据和变工况过程中的 14 组台阶数据对搭建的机理模型进行修正，大部分参数的仿真误差都在 1% 以下，只有个别工况的个别参数的误差稍大（大于 1%，小于 3%），因此说明此模型满足工程精度要求。具体试验数据与模型输出数据详见图 8-图 19，蓝线表示试验数据，红线表示模型输出数据。

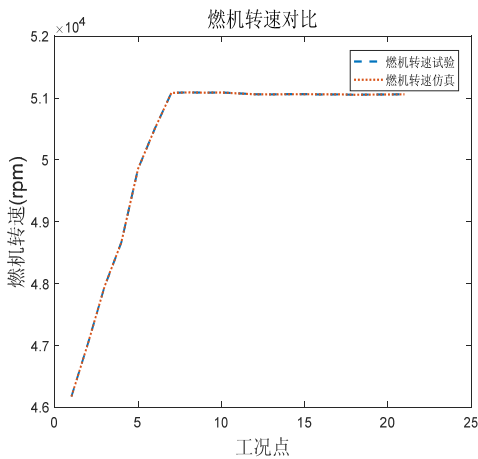


图 8 转速对比

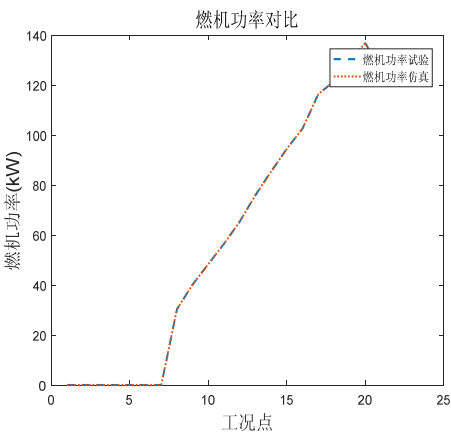


图 9 功率对比

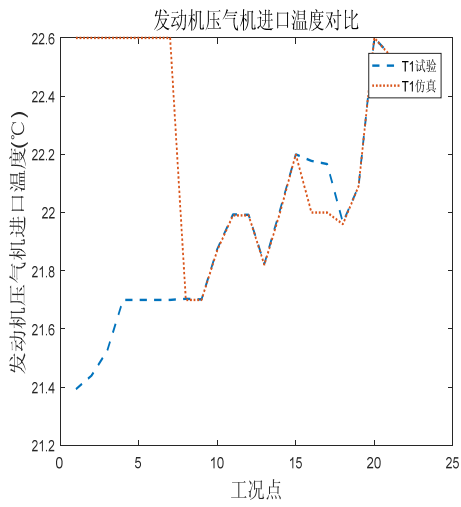


图 10 发动机进口温度对比

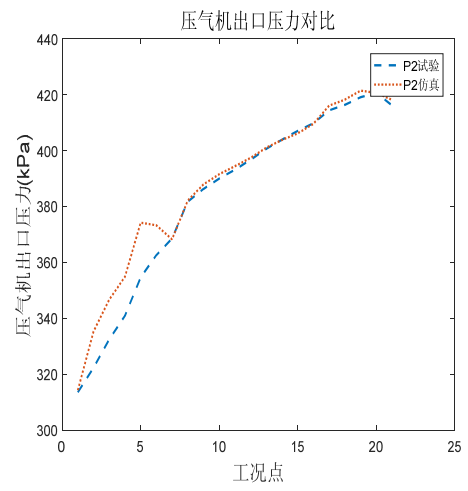


图 11 压气机出口压力对比

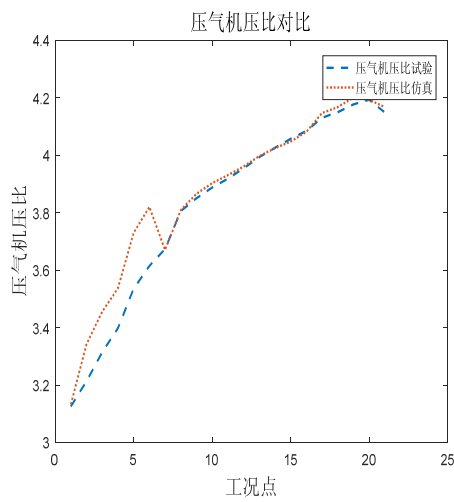


图 12 压气机压比对比

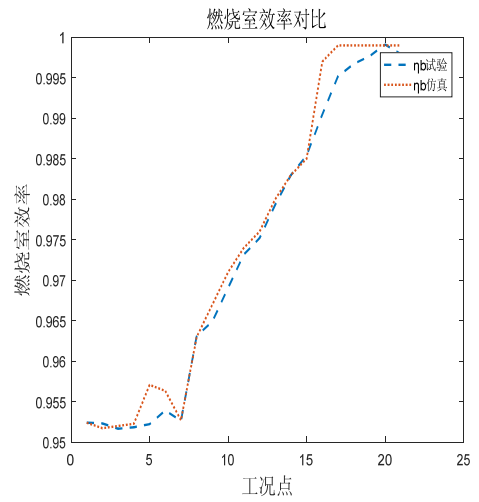


图 13 发动机燃烧室效率

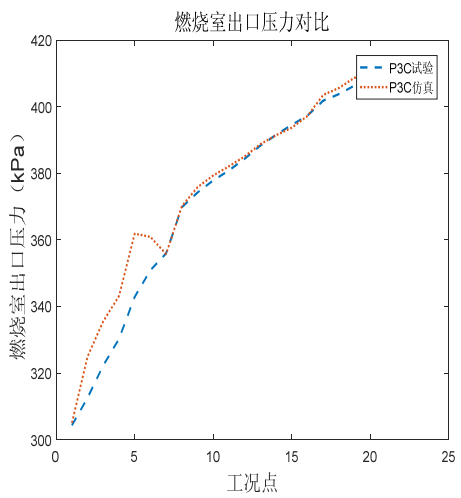


图 14 燃烧室出口压力对比

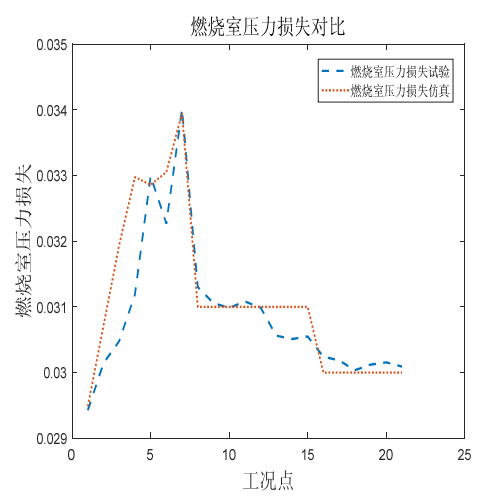


图 15 燃烧室压力损失对比

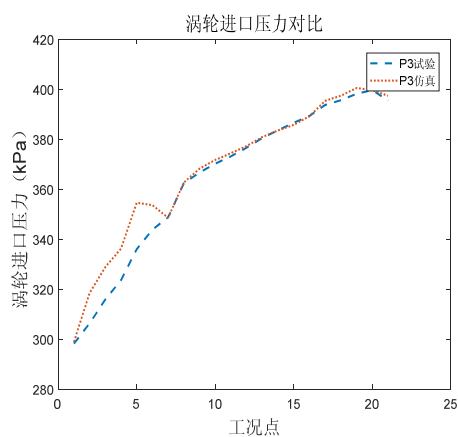


图 16 涡轮前出口压力对比

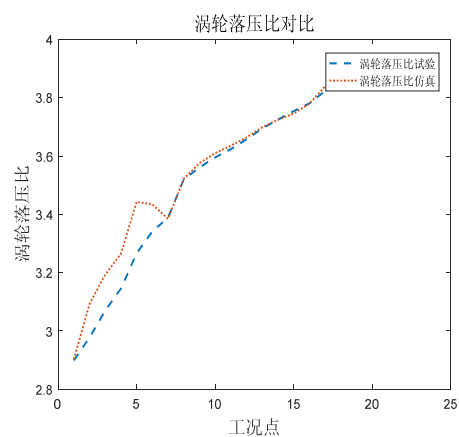


图 17 涡轮落压比对比

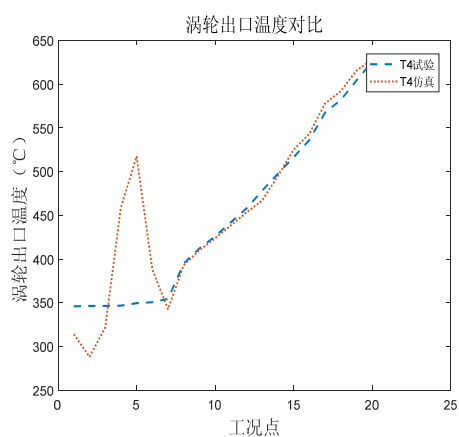


图 18 涡轮出口温度对比

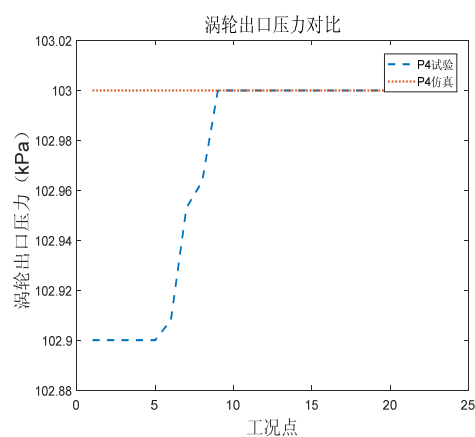


图 19 涡轮出口压力对比

### 3 模型集成与联合仿真

#### 3.1 模型集成

通过 MATLAB/Simulink 平台将起动模型和慢车转速以上模型集成到同一平台，集成后的模型分别由输入模块、燃机模型与控制器、起动模型与机理模型切换控制模块和输出模块组成，通过延时模块成功实现了起动模型和慢车转速以上模型的切换。具体参见图 20 所示。

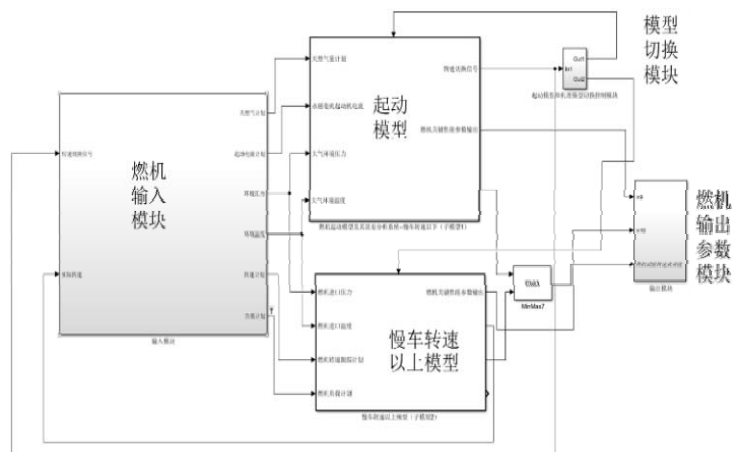


图 20 模型集成



3.2 模型仿真

为了实现模型集成之后的联合仿真，成功地实现了燃机加速过程转速轨迹的跟踪与燃机变工况加载控制。

4 仿真结果分析

4.1 转速跟踪误差分析

通过给定转速曲线，通过相应的控制器跟踪给定的转速曲线，仿真结果表明模型具备较好的收敛性与稳态精度。具体跟踪曲线如图 21 所示，图中蓝线表示模型输出转速，红线表示给定转速曲线，从图中得出模型能很好地跟踪给定转速曲线，验证了集成模型是有效的。

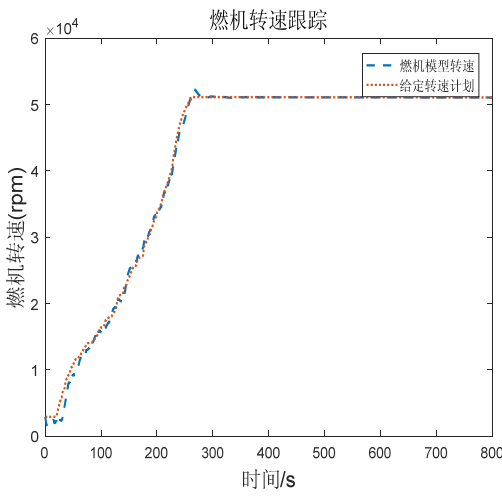


图 21 转速跟踪测试

4.2 燃机变工况加载过程误差分析

在 320s 时，燃机转速已经稳定在额定转速，对其进行加载，加载曲线详见图 23，随着载荷的增加，在相应控制器的控制作用下，燃机的转速能很好地跟踪给定功率曲线，同时能保证燃机转速保持在额定转速不变，由于图 23 中由于由起动模型切入机理模型后，由于机理模型处于加速过程，转速超调引起的实际输出功率波动，随着转速的迅速稳定，机理模型的实际输出功率在较短的时间内能稳定地跟踪给定功率曲线。

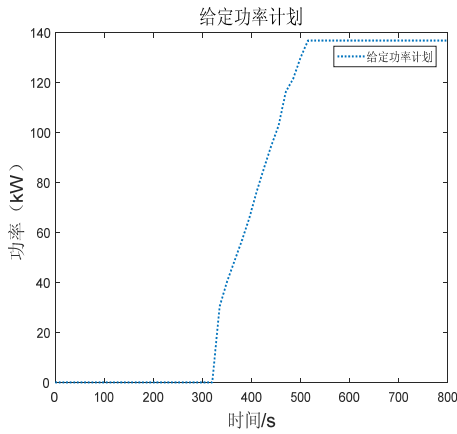


图 22 燃机给定功率曲线

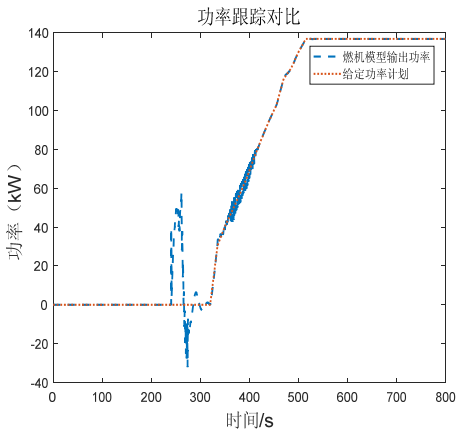


图 23 燃机功率跟踪曲线

## 5 结论

本文基于 MATLAB/Simulink 搭建了 100 千瓦微型燃气涡轮发动机模型，模型分为起动模型和慢车转速以上模型：

- (1) 实现了起动模型和慢车转速以上模型的集成与仿真，所建立的模型稳态误差在 3% 以内，动态误差在 5% 以内；
- (2) 在集成后模型的基础上，实现了燃机转速的跟踪控制和燃机的变工况加载跟踪控制；
- (3) 所建立的燃气涡轮发动机模型为验证其他先进算法提供了平台与奠定了基础。

## 参考文献

- [1] 周文祥, 黄金泉, 黄开明. 航空发动机简化实时模型仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37 (2): 251-255.
  - [2] 肖红亮, 李华聪, 李嘉, 等. 基于 QPSO 混合算法的变循环发动机建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44 (2): 305-315.
  - [3] 唐世建, 童万军. 基于容积法的某涡扇发动机动态建模方法[J]. 航空动力学报, 2013, 28 (3): 709-713.
  - [4] 姜伟. 基于 MATLAB 的涡轴发动机建模与控制系统实时仿真研究[D]. 南京, 南京航空航天大学, 2010.
  - [5] P.P. 沃尔什, P. 弗莱彻. 燃气涡轮发动机性能[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
  - [6] 李淑英, 王志涛. 燃气轮机性能分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2017.
-