# 基于动态特性分析的涡扇发动机 T-S 模糊建模 \*

仇小杰,陈 杰,范白清

(中国航发控制系统研究所, 江苏无锡 214063)

摘 要:面向具备强非线性特征的航空发动机这一复杂对象,考虑其在宽广包线内动态特性复杂难 以用有限个线性模型描述,提出一种基于发动机动态特性分析建立全包线涡扇发动机数学模型的方法。 基于全包线动态特性分析,设计动态特性表征参数λ。利用K均值聚类算法分析包线内发动机特性,依 据聚类的中心点建立全包线T-S模糊状态空间模型。开展了模型精度仿真验证,仿真结果表明,基于航 空发动机动态特性分析建立的全包线T-S模糊状态空间模型基本无稳态误差,且计算时间约为3ms。

关键词: 涡扇发动机; 动态特性分析; 动态特性表征参数; K均值聚类算法; T-S模糊模型 中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 01-22010038-07 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 22010038

# A Method Based on Dynamic Characteristic Analysis for Turbofan Engine T-S Fuzzy Model

QIU Xiao-jie, CHEN Jie, FAN Bai-qing

(AECC Aero Engine Control System Institute, Wuxi 214063, China)

**Abstract**: Aero-engine is a complex system with strong nonlinearity which is quite difficult to be described by limited linear models. A new method based on the aero-engine dynamic characteristics analysis to establish the full envelope aero-engine linear model is proposed. The method defined a set of characterization parameters  $\lambda$ based on the dynamic characteristic analysis of the full envelope. The feather of these engine parameters is extracted by the *K*-means clustering algorithm. The full envelope T-S fuzzy sate space model is composed of linear model of the clustering extracted center points. The simulation on model accuracy verification is conducted, and the results show that the T-S fuzzy state space model is almost no steady error and the calculating time is about 3ms.

**Key words**: Turbofan engine; Dynamic characteristic analysis; Dynamic characterization parameters; *K*-means clustering algorithm; T-S fuzzy model

# 1 引 言

航空发动机作为一类复杂的强非线性系统,很 难直接建立用于控制或是故障诊断的数学模型。在 工程应用中,航空发动机控制系统通常采用基于传 递函数模型的 PID 控制方法进行设计,这是一种基于 线性控制理论的方法<sup>[1-2]</sup>。然而航空发动机控制过程 中不可避免地面临着如建模误差、噪声、系统变量之 间耦合等扰动量,因此基于状态空间模型的多变量 控制方法得以发展,如LQR<sup>[3-4]</sup>,H<sub>\*</sub><sup>[5-6]</sup>,滑模控制<sup>[7-8]</sup> 等方法,上述方法在处理存在扰动问题的航空发动 机多变量控制方面相较于传统的PID方法表现出一

\* 收稿日期: 2022-01-20; 修订日期: 2022-04-06。

基金项目:国家科技重大专项(2019-V-0003-0094)。

通讯作者: 仇小杰, 博士, 研究员, 研究领域为航空发动机控制。E-mail: 65909677@qq.com

引用格式: 仇小杰,陈 杰,范白清. 基于动态特性分析的涡扇发动机 T-S模糊建模[J]. 推进技术, 2023, 44(1): 22010038. (QIU Xiao-jie, CHEN Jie, FAN Bai-qing. A Method Based on Dynamic Characteristic Analysis for Turbofan Engine T-S Fuzzy Model[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(1):22010038.) 定的优越性。但由于航空发动机自身特性复杂且飞 行状态多变,难以建立用于描述全包线全状态航空 发动机的有限个线性模型,这对依赖精确线性模型 的控制算法设计是个技术难题。

20世纪90年代,一种基于偏导数法求解连续形 式系统矩阵的方法由Sugiyama<sup>[9]</sup>提出,这是一种航空 发动机线性化模型的方法。该方法假设对任一状态 量或控制量做小扰动,强制其他状态量或控制量保 持不变,计算系统状态变量、输出变量的变化率以及 输出变量分别对状态变量、控制变量的偏导数,从而 获得系统矩阵。这种建立模型的方法尽管理论上是 完备的,但其在多变量建模的实际使用过程中,由于 偏导数法忽略了控制对象中状态变量和控制变量存 在的耦合关系,导致基于偏导数法建立的线性模型 存在着一定的建模误差。

基于拟合法的建模方法不需要计算偏导数<sup>[10]</sup>, 首先依据选取的状态变量、控制变量和输出变量的 数目,确定发动机对象系数矩阵的形式,由此确定发 动机小偏差模型的初猜模型,以初猜模型的线性动 态响应拟合非线性响应,不断修正系统系数矩阵获 得航空发动机的小偏差状态空间模型。该方法不适 用于高阶对象,因为其虽然不需要求解系统输出变 量对控制变量和状态变量的偏导数,但是需要求解 偏差线性模型系数矩阵元素和响应的解析关系。上 述理论都是针对航空发动机稳态工作点的线性建模 方法研究,而在实际的飞行过程中,稳态工作点不断 改变,以上方法在线建立面向控制器设计的线性模 型时存在计算耗时长、难以满足控制系统实时性要 求等问题,因此上述方法不能有效地用于全包线情 况下的建模需求。面向发动机全包线控制,学者们 提出了线性变参数的控制方法(Linear Parameter Varying, LPV)结合增益调度来设计控制器。这种方 法通过实时可测量参数或可估计参数来确定系统状 态矩阵,实现控制器随着可变参数实时调动。但是 线性模型想要应用到全包线范围,需要在多个工作 点建立大量的线性模型并设计相应的控制器,这将 会导致LPV过于复杂同时还会存在控制器切换不连 续等问题。

模糊方法具备非线性的本质特征,故其在解决 非线性强和结构复杂的控制对象有着良好的性能和 内在优势<sup>[11-12]</sup>。由于模糊建模方法理论上能够有任 意精度逼近一个非线性对象,使得其在描述复杂的 非线性控制系统中得到了大量的应用<sup>[13-16]</sup>。模糊方 法建模通过输入输出数据以及先验知识两种手段获 得模糊规则,保证了模型具备较好的适应能力,因此 其与鲁棒控制<sup>[17-18]</sup>和不确定性控制<sup>[19-20]</sup>的结合能够 充分发挥了各自的优势,为高性能航空发动机控制 系统设计实现提供了可能性<sup>[21-23]</sup>。

考虑涡扇发动机动态特性的强非线性,本文提 出一种基于动态特性分析的发动机T-S模糊模型的 建模方法。提取涡扇发动机状态空间模型系统矩阵 特征值为动态特征的特征参数,采用K均值聚类算 法,对飞行包线内不同工作点的特征参数进行聚类。 通过类中心获得T-S模糊模型的最优规则数,由此建立涡扇发 动机T-S模糊模型。

本文通过基于动态特征的聚类方法建立发动机 全包线T-S模糊模型,与传统的LPV方法相比:T-S 模型通过定义发动机动态表征能够获得发动机典型 动态特征,使得T-S模糊模型所包含的发动机动态特 性更为丰富和完整;另一方面通过智能算法优化了 T-S模糊模型规则数,在保证模型精度的同时降低了 模型复杂性,减少模型在线应用的计算时间,相比 LPV模型T-S模糊模型形式更加简单。

#### 2 航空发动机T-S模糊模型

#### 2.1 航空发动机动态特性表征

航空发动机数学模型为

$$\dot{\boldsymbol{x}} = f_1(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}, \boldsymbol{w}) \boldsymbol{y} = f_2(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}, \boldsymbol{w})$$
(1)

式中 $x \in R^n$ 为系统的状态变量, $u \in R^m$ 为系统的控制 变量, $w \in R^t$ 为外界的扰动信息, $y \in R^t$ 表征系统的 输出变量。 $f_1, f_2$ 分别表示状态方程和输出方程的输 入输出信息之间的非线性关系。

式(1) 描述的航空发动机数学模型利用拟合法 和偏导数法可获得航空发动机在稳态工作点的小偏 差状态空间模型, 该模型表达形式如下, 即

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u + B_{\perp}\Delta w$$
  
$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u + D_{\perp}\Delta w$$
 (2)

式中已知维度的常数矩阵是系数矩阵,  $A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times m}, B_1 \in R^{n \times k}, C \in R^{l \times n}, D \in R^{l \times m},$  $D_1 \in R^{l \times k}$ 。

由于传递函数不包含不确定性的标称系统,则 考虑式(2)描述的线性小偏差系统的传递函数矩 阵为

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D$$
(3)

式中 $(sI - A)^{-1}$ 可分解为

$$(sI - A)^{-1} = \frac{1}{|sI - A|} A_{ij}, i = 1 \cdots n, j = 1 \cdots n$$
 (4)

式中 $A_{ij} \in R^{n \times n}$ 为矩阵(sI - A)的伴随矩阵,|sI - A|为矩阵(sI - A)的行列式。

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = C \frac{1}{|sI - A|} A_{ij}B + D =$$

$$\frac{1}{|sI - A|} CA_{ij}B + D$$
(5)

式(5)中系统传递函数矩阵中元素为矩阵(sI-A)的行列式,其分母是一致的。式(6)的解是系统 (2)的极点,即

$$\left| sI - A \right| = 0 \tag{6}$$

式(6)表明系统(2)的极点为系数矩阵A的特征 值。因此,可依据系统矩阵A的特征值来表征系统在 不同工作点的动态特性。在小扰动方法建模中,A矩 阵与式(6)含义一致表征着系统的动态特性,B矩阵 实际关系着线性模型的稳态误差,而本文主要研究 发动机的动态特性,因此本文所考虑的特性参数是 矩阵A的特征值。定义靠近虚轴的矩阵A特征为主 导特征值λ的原因是远离虚轴的极点对系统相应作 用较为微弱而靠近虚轴的极点对系统的相应作用 显著。

$$\lambda = \left(\lambda \left| \min_{m} \left( \left| \operatorname{Real}(\lambda_{m}) \right| \right) \right), m = 1, 2, ..., n$$
 (7)

式中 $\lambda_m$ 为矩阵A的特征值,Real( $\cdot$ )表征特征值的实部。因此,式(7)描述的主导特征值可以对发动机对象的动态特性进行描述。

#### 2.2 航空发动机 T-S 模糊模型数学描述

T-S模糊模型因其具备高精度拟合复杂非线性 模型的能力成为一种有效描述非线性对象的手段。 面向航空发动机这一强非线性对象,基于 if-then 规 则设计航空发动机T-S模糊模型。

T-S模糊模型由 if-then 规则组成,对于第 i 条模 糊规则,写为

Rule *i*: If  $v_i$  is  $L_{i1}$  and  $\cdots$  and  $v_g(t)$  is  $L_{ig}$ , then

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}(t)$$
  
$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_i \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_i \mathbf{u}(t)$$
(8)

式中 $v_i$ 为第1个前件变量, $v_g(t)$ 为第g个前件变量。  $L_{ii}$ 和 $L_{ig}$ 为标称点的前件变量,式(8)中的 $A_i$ , $B_i$ , $C_i$ , $D_i$ 为标称点i的状态空间模型。

基于式(8) 描述的 if-then 规则发现 T-S 模糊模型 的关键参数在于规则数的数目、前件变量及标称点 的选取策略。对于一定的控制规律与供油量下的 航空发动机,如果进气道确定,可认为进口总温 T<sub>1</sub> 和进口总压<sub>P1</sub>决定了航空发动机小偏差状态模型。 在航空发动机部件级模型计算过程中,对模型特性 起着关键作用的是进口总温 T<sub>1</sub>与进口总压<sub>P1</sub>作为 部件计算的初始输入信息。因此选择航空发动机 进口总温 T<sub>1</sub>,进口总压<sub>P1</sub>作为 T-S 模型的前件 变量。

T-S模糊模型规则数及标称点的选取关系着所 建立的T-S模糊模型规则数及标称点改取策略研究。 开展T-S模糊模型规则数及标称点选取策略研究。 本文基于所设计的主导特征值λ开展发动机飞行包 线内动态特性研究,基于K均值聚类算法研究T-S模 糊模型规则数及标称点的选取策略,获得保证T-S模 糊模型具备实时性与高精度的if-then规则数目与标 称点。

基于式(8)所描述的 if-then 规则,构建 T-S 模糊 模型。综合所有规则,飞行包线内典型工作点下 T-S 模糊模型写为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_{z}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_{z}\mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_{z}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_{z}\mathbf{u}(t)$$
(9)

式中x(t)为状态变量;u(t)为控制变量;y(t)为输出 变量。A., B., C., D.为适维矩阵。其中

$$A_{z} = \sum_{i=1}^{r} h_{i}(v(t))A_{i}, B_{z} = \sum_{i=1}^{r} h_{i}(v(t))B_{i},$$
  

$$C_{z} = \sum_{i=1}^{r} h_{i}(v(t))C_{i}, D_{z} = \sum_{i=1}^{r} h_{i}(v(t))D_{i}$$
(10)

式(10)表征当前前件变量下系统的后件变量即线性 模型表达形式,其中

$$h_{i}(v(t)) = \mu_{i}(v(t)) / \sum_{i=1}^{r} \mu_{i}(v(t)),$$
  

$$\mu_{i}(v(t)) = \prod_{i=1}^{s} L_{ii}(v_{i}(t))$$
(11)

参数 $h_i(v(t))$ 表征当前前件变量下后件变量隶属于 第i条 if-then 规则后件变量的权重,满足

$$h_i(v(t)) > 0, \sum_{i=1}^r h_i(v(t)) = 1$$
 (12)

 $L_{ij}(v_{j}(t))$ 为隶属度函数,本文选取高斯隶属度

$$L_{ij} = e^{\frac{-(v_{ij} - v_{ij}^*)^2}{2\sigma}}$$
(13)

式中 $v_{ii}^*$ ,  $j = 1, 2 \cdots g$ 为第i个特征点的飞行条件参数。

因此,航空发动机T-S模糊模型if-then规则的前件变量为进口总压*p*<sub>1</sub>和飞行条件进口总温*T*<sub>1</sub>,当前飞行条件下的线性小偏差模型是规则的后件变量。

#### 3 基于*K*均值的发动机动态特征聚类方法

基于式(7)描述的航空发动机动态特性表征参

数,利用K均值聚类算法进行航空发动机飞行包线动态特性研究,基于聚类中心稳态工作点建立T-S模型的标称点模型。

K均值算法通过不断的迭代来实现聚类,当算法 满足收敛条件时就终止迭代并获得聚类结果,其本 质上属于基于划分的聚类算法。

待聚类的数据集X为

$$\boldsymbol{X} = \left( x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n \right)$$
(14)

首先依据聚类的簇数目随机初始化聚类中心  $C_j(I), j = 1, 2, ...k, I$ 为聚类迭代次数。面向航空发动 机动态特性分析的待聚类数据集X初始设置为式(7) 描述的动态特性表征参数 $\lambda$ ,考虑发动机特征参数在 飞行包线部分工作点存在虚部的情况,因此将用于K均值聚类的输入参数数据集定义为

依据式(15)中*n*个待聚类数据点与这*k*个聚类中 心 *C<sub>j</sub>*(*I*)的距离*d*(*x<sub>i</sub>*, *C<sub>j</sub>*(*I*))将数据集中*n*个数据点划 分到相近的簇 *M<sub>i</sub>*中,若满足

$$d\left(x_{i}, \mathcal{C}_{j}(I)\right) = \min\left(d\left(x_{i}, \mathcal{C}_{1, 2, \dots, k}(I)\right)\right)$$
(16)

则 $x_i \in M_j$ 。其中,划分距离 $d(x_i, C_j)$ 一般定义为欧氏 距离。

基于该聚类结果采用均值计算更新每个簇 $M_j$ 中的新聚类中心 $C_i(I+1)$ ,

$$C_{j}(I+1) = \frac{1}{N} \sum_{\substack{i=1\\x_{i} \in M_{i}}}^{N} x_{i}, \ j = 1, 2, \cdots, k$$
(17)

重复计算数据点到聚类中心的距离  $d(x_i, C_j(I+1))$ 更新簇  $M_j$ 直至达到最大迭代次数或是连续几次聚类 结果中簇  $M_j$ 未发生变化。算法达到收敛后,聚类结 果中的聚类中心即为 T-S 模糊模型的标称点。

因此,基于*K*均值的发动机动态特征聚类方法如表1所示。

# Table 1 Dynamic feature clustering method for engines based on K-means

Algorithm: Dynamic feature clustering method for engines based on *K*-means

Step 1 Input: dataset  $X = [\text{Real}(\lambda_i) \text{ Imag}(\lambda_i)], i = 1, 2, ...n$ , the number of clusters k, the number of iterations

Step 2 Initialize: let I=1, initializing the cluster centers randomly  $C_i(I), j = 1, 2, ...k$ 

Step 3 Clustering: calculating the distance  $d(x_i, C_j(I))$  between each data  $x_i$  and the center  $C_j(I)$  and clustering, the rule of  $x_i \in M_j$ is:

$$d\left(x_{i}, C_{j}(I)\right) = \min\left(d\left(x_{i}, C_{1, 2, \dots, k}(I)\right)\right)$$

Step 4 Update the centers: updating the centers based on the average of the clusters

$$C_{j}(I+1) = \frac{1}{N} \sum_{x_{i} \in M_{j}}^{N} x_{i}, j = 1, 2, ...k$$

Step 5 Judge: if  $C_j(I + 1) = C_j(I)$  or the iteration reaches to the maximum, the algorithm is convergent and output the clustering results. Otherwise, repeating the step 3 until the algorithm converges. Step 6 Output: getting the T-S fuzzy model nominal operating points based on the final cluster centers  $C_j(I + 1)$ , the linear models on the nominal operating points are established, and then combining the membership (11), (13) to construct the aeroengine T-S fuzzy model.

## 4 模型验证与分析

本文以某涡扇发动机为建模对象,见图1所示。 开展基于航空发动机动态特性参数λ的T-S模糊 建模。

在飞行包线平面内选择 53 个工作点。基于涡扇 发动机部件级模型,利用偏导数法建立线性小偏差 模型并计算特性表征参数λ,利用 K 均值聚类算法对 飞行包线特征参数进行特征划分,依据聚类结果为 建立全包线 T-S 模糊状态空间模型提供规则数与标 称点信息。考虑在同一稳态工作点利用小扰动法建 模时,随着扰动尺度的不同,所建立的状态空间模型 可能不唯一,针对该问题,本文所有标称点模型在建



<sup>22010038-4</sup> 

立时状态、输入的扰动皆设置为2%,从而保证建模尺度的统一。上述包线工作点的特性表征参数λ部分信息列入表2。可以发现,在飞行包线平面内不同工作点处的发动机特性相差很大,如在第12个工作点(H=2km, Ma=1.0)处不存在虚部表示发动机在这种工作状态下不存在振荡,而在其他工作点则有一定程度的振荡。

 
 Table 2
 Characterization parameters of operating points in the envelope

Operating points	$\operatorname{Real}(\lambda)$	$\operatorname{Imag}(\lambda)$	
1	-2.8926	-0.5311	
2	-3.2509	-0.5901	
:	:	÷	
12	-5.8770	0	
÷	:	÷	
53	-1.6886	-0.2564	

依据表 2 所示的发动机动态表征参数设计 T-S 模糊规则。由式(8)知 if-then 模糊规则数影响着 T-S 模糊模型性能,理论上模糊规则越多 T-S模糊模型精 度越高,但随之模型也越复杂。因此,需要设计合适 的模糊规则数。本文依据飞行包线范围,考虑 T-S模 糊模型的规则数尽可能涵盖包线发动机特性,将 K均 值聚类算法的类中心数目设置为 6<sup>[24]</sup>。算法经过迭 代计算,对于选择的飞行包线 53 个工作点将其划为 6 个簇,聚类中心工作点分别为 25,40,28,17,15,12, 其聚类结果显示如图 2。基于 K均值算法聚类结果, 获得全包 T-S 模糊模型的 if-then 规则数为 6 以及相 应的标称点模型。

T-S模糊模型中后件变量线性小偏差模型状态 变量为 $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} n_{\text{L}} & n_{\text{H}} \end{bmatrix}^{\text{T}},$ 输入变量为 $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} W_{\text{f}} & A_{\text{s}} \end{bmatrix}^{\text{T}},$ 输 出变量为 $\mathbf{y} = \begin{bmatrix} n_{\text{H}} & EPR \end{bmatrix}^{\text{T}}$ 。其中 *EPR* 是发动机落压 比, $n_{\text{L}}$ 和 $n_{\text{H}}$ 是发动机低压转速和高压转速。



Fig. 2 Clusters of the envelope based on A-means

针对本文建立的T-S模糊模型,共有6条if-then 规则。具体的if-then规则写为

if  $T_1$  is 1.1998 and  $p_1$  is 1.4792, then

$$A_{1} = \begin{bmatrix} -9.8354 & 4.3926 \\ -1.1019 & -4.1073 \end{bmatrix}, B_{1} = \begin{bmatrix} 0.7465 & 1.2246 \\ 0.7844 & 0.3004 \end{bmatrix}, C_{1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.5791 & -0.4374 \end{bmatrix}, D_{1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.4412 & 0.1296 \end{bmatrix}$$

if  $T_1$  is 1.1437 and  $p_1$  is 1.4830, then

$$\boldsymbol{A}_{6} = \begin{bmatrix} -10.5931 & 4.9562 \\ -1.1852 & -4.6315 \end{bmatrix}, \boldsymbol{B}_{6} = \begin{bmatrix} 0.7935 & 1.1826 \\ 0.8757 & 0.3372 \end{bmatrix}, \boldsymbol{C}_{6} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.5525 & -0.4414 \end{bmatrix}, \boldsymbol{D}_{6} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.4349 & 0.1285 \end{bmatrix}$$
(18)

对以上述6个聚类中心为标称点建立的T-S模 糊模型进行模型精度仿真测试。基于T-S模糊模型 与非线性部件级模型,在包线内选取非聚类中心工 作点开展相同输入信号下的两个模型输出响应对 比,仿真结果如图3,4所示。T-S模糊模型精度测试 分为两个部分:首先对航空发动机稳态燃油 W<sub>f</sub>作2% 的小阶跃,保持A<sub>8</sub>不变,分别仿真T-S模糊模型和非



Fig. 3 Responses on H=9km, Ma=0.88 with 2% W<sub>f</sub> step



Fig. 4 Responses on H=9km, Ma=0.88 with 2% A<sub>8</sub> step

线性部件级模型的动态响应。然后将A<sub>s</sub>作2%的小阶跃,保持W<sub>f</sub>不变,分别仿真T-S模糊模型和非线性部件级模型的动态响应。

此外,在飞行包线内选取多组非聚类中心点开 展模型精度及实时性测试,见表3。并计算相应的模 型计算时间(见表4)与均方根误差(Root Mean Square Error,*RMSE*)(见图5)。实时性仿真计算平台CPU主 频3.20GHz,RAM 4GB。

由图 3,图 4 仿真结果可以看出,依据动态特性分析建立的航空发动机 T-S 模糊模型具备较高的动、稳

Operating points	<i>H</i> /m	Ma	
1	6000	1.0	
2	10000	0.8	
3	8000	0.6	
4	2000	0.4	
5	4000	1.2	
6	10000	1.0	
7	12000	1.2	
8	4000	0.6	
9	16000	1.2	
10	8000	1.6	

Table 3 Steady operating points for test

态精度,能够有效地模拟发动机特性,适用于作为发动 机控制与故障诊断设计的被控对象模型。基于图5 的*RMSE*仿真结果表明,在飞行包线不同稳态工作点 小阶跃仿真过程中,T-S模糊模型*RMSE*处于10<sup>-3</sup>量 级,表明T-S模糊模型在飞行包线不同工作点下仍具 备高精度的动、稳态性能。图5中第10个工作点相 对而言精度较低,因其位于飞行包线边界位置,发动 机本身特性极为复杂且附近样本较少,因此难以建 立高精度的线性模型。表4内容表明离线设计的T-S 模糊模型用于在线计算稳态工作点模型时具备很高 的实时性。因此,尽管航空发动机T-S模糊模型是一

## Table 4 Calculation times of the T-S fuzzy model and the perturbation method

Operating points	T-S fuzzy model/ms	Perturbation/ms
1	2.7	1490
2	3.0	1720
3	3.4	1890
4	2.9	1550
÷	÷	÷
10	3.4	2020





22010038-6

种二次建模方法,但其具备高精度与高实时性,可作 为机载模型使用。

## 5 结 论

通过本文研究,得到如下结论:

(1)本文提出一种基于发动机动态特性分析结 合模糊模型的T-S模糊状态空间模型建模方法。

(2)设计发动机动态特性表征参数,利用智能聚 类算法分析系统在不同飞行条件下特性表征参数的 规律,实现航空发动机动态特性划分。以包线特性聚 类区域中心为标称点建立T-S模糊状态空间模型,根 据进口总温和进口总压为T-S模糊模型的前件变量, 描述全包线任一工作点下的航空发动机线性模型。

(3)在飞行包线内非聚类中心点开展T-S模糊模型精度与实时性验证,仿真结果表明,T-S模糊模型与部件级模型相比基本无稳态误差且计算时间约为3ms,具备很好的精度与实时性,能够为涡扇发动机机载模型建立提供良好的建模方法参考。

致 谢:感谢国家科技重大专项的资助。

#### 参考文献

- [1] 董 劲,黄金泉.航空发动机多变量模糊 PID 控制
   [J].航空动力学报,2003,18(4):538-541.
- [2] 仇小杰,林星辰,王全胜,等.一种弹用发动机控制 系统高空转速超调控制技术应用研究[J]. 航空发动 机,2018,44(3):31-35.
- [3] 杨 刚,姚 华.一种航空发动机相似多变量控制方 法[J].航空动力学报,2006,21(3):588-594.
- [4] 岳 聪,任兴民,邓旺群,等.航空发动机转子突加 不平衡参数分析及LQR控制技术应用[J].振动与冲 击,2015,34(17):174-179.
- [5] 谢光华,曾庆福.基于LMI的航空发动机鲁棒 H<sub>\*</sub>控制 器设计[J].航空学报,2000,21(2):175-178.
- [6] Pan M, Zhang K, Chen Y-H, et al. A New Robust Tracking Control Design for Turbofan Engines: H<sub>x</sub>/Leitmann Approach[J]. Applied Sciences, 2017, 7(5).
- [7] 徐清诗,郭迎清.基于滑模控制方法的航空发动机控制 系统改进设计[J].航空发动机,2015,41(6):33-38.
- [8] 杜 宪,郭迎清,孙 浩,等.基于滑模控制的航空 发动机多变量约束管理[J].航空学报,2016,37 (12):3657-3667.
- [9] Sugiyama N. Derivation of System Matrices from Nonlinear Dynamic Simulation of Jet Engines[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1994, 17(6): 1320-1326.
- [10] 冯正平,孙健国,黄金泉,等.一种建立航空发动机

状态变量模型的新方法[J]. 航空动力学报, 1998, 13 (4): 86-89.

- [11] 张化光,何希勤.模糊自适应控制理论及其应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [12] 诸 静. 模糊控制理论与系统原理[M]. 南京: 机械 工业出版社, 2005.
- [13] 王宏伟,马广富,王子才.非线性系统在线模糊建模的快速算法[J]. 航空学报,1999,20(3):48-50.
- [14] Takagi Tomohiro, Michio Sugeno. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control[J].
   *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, 15(1): 116-132.
- [15] 罗秋滨,谢元贞.非线性系统的模糊建模方法研究[J].哈尔滨理工大学学报,2006(6):19-21.
- [16] 徐 喆, 毛志忠. 一种基于模糊规则融合的模糊建模方 法及其应用[J]. 控制与决策, 2013, 28(2): 169-176.
- [17] Lu Y. Adaptive-Fuzzy Control Compensation Design for Direct Adaptive Fuzzy Control[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(6): 3222-3231.
- [18] Nguang S K. Comments on Fuzzy H<sub>x</sub> Tracking Control for Nonlinear Networked Control Systems in T-S Fuzzy Model
   [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B(Cybernetics), 2009, 40(3).
- [19] Pan M, Wang H, Gu B, et al. A Hierarchical Robust Control Design with Non-Parallel Distributed Compensator and Application to Aircraft Engines[J]. *IEEE Access*, 2019(7): 144813-144825.
- [20] Li L. H<sub>x</sub> Control for Parameter Uncertain T-S Fuzzy Systems with Time-Delay in State and Control Input [C].
   Mianyang: 2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2011.
- [21] 蔡开龙,谢寿生,吴 勇.基于T-S模糊模型的航空 发动机模型辨识[J].推进技术,2007,28(2):194-198. (CAI Kai-long, XIE Shou-sheng, WU Yong. Identification of Aero-Engines Model Based on T-S Fuzzy Model [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007,28(2):194-198.)
- [22] 翟旭升,谢寿生,苗卓广,等.基于T-S模糊模型的航 空发动机非线性分布式控制系统故障诊断[J]. 航空 动力学报,2013,28(6):1429-1435.
- [23] Hou X, Li P, Fang Z, et al. An Application of Fuzzy PID Algorithm on Unmanned Helicopter Attitude Control
  [C]. Dalian: 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006.
- [24] Pan M, Wang H, Huang J. T-S Fuzzy Modeling for Aircraft Engines: The Clustering and Identification Approach[J]. Energies, 2019, 12(17).