

# 涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制研究

王超

(交通运输部救助打捞局, 北京 100736)

**摘要:** 常规的涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制技术, 对发动机转速扭矩参数的调整不太精准, 导致转速控制效果较差; 因此, 提出涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制研究; 文章首先对逻辑进行模糊化处理, 得到相应的隶属度函数, 对其进行模糊推理, 并采用重心法进行去模糊化; 将模糊子集的参数作为控制器的主要参数, 形成涡轴航空发动机转速模糊控制器; 再基于此, 构建转速模糊控制器系统结构, 以便后续对实施自适应模糊控制; 最后对变化率的调整规则进行设计, 将转速波动控制在较小的范围内, 并建立参数调整规则表, 按照模糊自整定数值关系, 对发动机转速扭矩参数进行精确调整, 从而对发动机转速进行自适应模糊控制; 仿真结果表明, 使用文章设计的方法, 对涡轴航空发动机转速进行自适应模糊进行控制后, 能够较好地控制发动机转速控制在 3 000 rpm 附近小波动振荡, 说明该方法的控制效果较好; 当阶跃干扰为  $10 \text{ N} \cdot \text{m}$  时, 转速波动在 11.38 ~ 17.77 rpm 之间, 当阶跃干扰为  $15 \text{ N} \cdot \text{m}$  时, 转速波动的平均值在 11.69 ~ 17.81 rpm 之间, 相对于对比方法均较小, 说明该方法具有较好的应用价值。

**关键词:** 涡轴航空发动机; 转速控制; 自适应模糊控制; PID 控制器; 模糊控制器; 转速扭矩参数

## Research on Adaptive Fuzzy Control of Turboshaft Aeroengine Speed

WANG Chao

(Rescue and Salvage Bureau of the Ministry of Transport, Beijing 100736, China)

**Abstract:** Conventional adaptive fuzzy control technologies for the speed of turboshaft aviation engines do not accurately adjust the speed and torque parameters of engines, resulting in poor speed control effect. Therefore, an adaptive fuzzy control method of turboshaft aviation engine speed is proposed. Firstly, the control logic is fuzzy to obtain the corresponding membership function, complete the fuzzy reasoning, and de-fuzzify it by using the center of gravity method. Then, the parameters of the fuzzy subset are taken as the main parameters of the controller to build the turboshaft aero engine speed fuzzy controller. Based on this, the system structure of speed fuzzy controller is constructed to implement the adaptive fuzzy control in the future. Finally, the adjustment rule of the change rate is designed to control the speed fluctuation in a small range, build the parameter adjustment rule table, precisely adjust the engine speed and torque parameters according to the fuzzy self-tuning numerical relationship, and carry out the adaptive fuzzy control of the engine speed. The simulation results show that the proposed method can be used to control the turboshaft aero engine speed of 3 000 rpm, which has a good control effect. The speed fluctuation is between 11.38 rpm and 17.77 rpm, with a step interference of  $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ ; The average speed fluctuation is between 11.69 rpm and 17.81 rpm, with a step interference of  $15 \text{ N} \cdot \text{m}$ , which is smaller than the comparison methods, indicating that the proposed method has a good application value.

**Keywords:** turboshaft aircraft engine; speed control; adaptive fuzzy control; PID controller; fuzzy controller; speed and torque parameters

## 0 引言

涡轴航空发动机作为现代飞机的关键组件之一, 其具有较为复杂的机械结构和较强的非线性特性<sup>[1]</sup>, 对飞机的性能和航空安全起着至关重要的作用。为了保障涡轴航空发动机的性能和航空安全, 转速控制至关重要<sup>[2]</sup>。涡轴航空发动机转速的控制不仅直接影响发动机的性能和效率, 还与燃油雾化、振动、冲击等因素密切相关<sup>[3]</sup>。因此, 对于涡轴航空发动机转速的控制需要一种适应性强、能够应对非线性特性的控制方法。在转速控制中, 模糊控制是一种常

用的非线性控制方法, 其具有工作范围宽、对参数变化和外部干扰具有较好的鲁棒性等特点<sup>[4]</sup>, 因此, 它能够较好地适应涡轴航空发动机系统的复杂性和不确定性。通过模糊控制的调整, 可以有效实现对转速的精确控制, 提高发动机的稳定性和运行效率<sup>[5]</sup>。

目前在涡轴航空发动机的转速控制中, 主要有以下几种研究, 文献 [6] 提出, 将 PID 参数的实时值作为参数增量值的输入值, 得到反馈增益矩阵, 在此基础上, 建立平衡点线性化模型, 通过模型对涡轴航空发动机转速的自适

收稿日期: 2023-08-11; 修回日期: 2023-09-15。

作者简介: 王超 (1985-), 女, 大学本科, 工程师。

引用格式: 王超. 涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(4): 106-112.

应模糊进行控制,该方法下工作量较大,必须采用插值的方式进行参数的求解,使得系统不稳定,转速控制效果较差。文献[7]提出,对环境的变化进行研究,采用自适应控制律,让系统跟踪参考模型,该方法具有较好的解耦效果,但约束条件较多,不能够满足复杂信息的交互,控制效果一般。文献[8]提出,建立三层神经网络,针对航空发动机的非线性特点,对航空发动机的动态特性进行研究,并通过模糊解耦控制器,对涡轴航空发动机转速的自适应模糊进行控制,该方法下其控制器自学习能力较强,能够及时修正模糊规则,控制效果较好,具有较好的应用价值。

为了进一步提升涡轴航空发动机转速控制的性能,本文以这些研究成果为基础,引入自适应模糊控制,提出一种涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制技术。自适应模糊控制结合了自适应控制和模糊控制的优势,能够根据实时的系统状态和外部干扰进行自适应调节<sup>[9]</sup>。通过自适应模糊控制,可以实现对转速控制系统的动态调整和优化,从而提高转速控制的精确性和稳定性<sup>[10]</sup>。

本文以PID控制器为基础,对模糊逻辑进行模糊化处理得到隶属度函数,推理模糊机制并去模糊化得到涡轴航空发动机转速的模糊输出值;将模糊子集的参数作为控制器的主要参数,设计涡轴航空发动机转速的模糊控制器;根据三角形隶属度函数的特性,设置两个模态缓冲,使发动机信号能够逐渐收敛到期望的状态。利用神经网络结构,对发动机转速控制系统结构进行论述,确保后续自适应模糊控制的效果。根据经验设计模糊控制规则,为了将转速波动控制在较小的范围内,基于模糊控制器对发动机转速扭矩参数进行调整,实现对发动机转速的自适应模糊控制。最后通过仿真实验分析验证本文方法的控制效果,以期为改善涡轴航空发动机的转速控制性能提供一定参考,进而实现提高飞机安全性和可靠性的目标。

## 1 涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制

在涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制中,发动机转速自适应模糊控制是一种重要的方法,它可以根据实时的系统状态和外部干扰进行自适应调节,以实现更精确和稳定的转速控制<sup>[11]</sup>。

### 1.1 模糊控制器结构设计

在涡轴航空发动机转速控制中,模糊控制器是实现自适应调节的核心部分。为了有效达到对涡轴航空发动机转速的控制,设计一个有效的模糊控制器可以提高转速控制的精度和响应速度。

模糊控制器是一种基于模糊推理机制的控制器,用于处理模糊或不确定的输入,并生成相应的控制信号。它的结构通常由模糊化、模糊推理和去模糊化这3个部分组成<sup>[12]</sup>。

模糊化是将清晰的输入值转换为模糊集合的过程。它通过隶属度函数来量化输入值的隶属度,反映其与模糊集合之间的关系。在模糊化的过程中,常见的隶属度函数包

括三角形、梯形和高斯等函数。由于参数较少,操作和调整起来更加简单和方便<sup>[13]</sup>,且其在实际应用中更加适用于对涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制,故在本次研究中,采用三角形隶属度函数 $F$ 。其表达式如式(1)所示:

$$F = \max \left\{ \min \left( \frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right\} \quad (1)$$

其中: $a$ 表示隶属度函数的左顶点,是输入变量在模糊集合中的起始值, $b$ 表示隶属度函数的峰值或拐点,是输入变量的峰值位置或转折点, $c$ 表示隶属度函数的右顶点,是输入变量在模糊集合中的结束值。

对压力环的参数进行设计,当进气压力时间常数,比发动机转速的时间小,则按照参数计算发动机低压转速误差,具体如式(2)所示:

$$Z = X(C+V) \frac{1}{B} \quad (2)$$

其中: $X$ 表示连接权重参数, $C$ 表示输出层的连接权重参数, $V$ 表示激活函数, $B$ 表示输入状态参数, $Z$ 表示连接权重向量,则按照网络反向传播,对参数进行更新,得到其效用函数,具体如式(3)所示:

$$N = \sqrt{M} \sum (Z+A \cdot S) \quad (3)$$

其中: $M$ 表示网络参数, $A$ 表示网络学习率, $S$ 表示学习率初始值,一般为0.001,按照效用函数,对参数进行更新,得到参数更新规则,具体如式(4)所示:

$$D = \frac{(F+G \cdot H) \cdot J}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

其中: $F$ 表示收敛参数, $G$ 表示主燃油流量变化值, $H$ 表示参数控制精度, $J$ 表示主燃油流量变化值,按照更新参数,得到自适应动态参数,具体如式(5)所示:

$$K = (D-Q) \sqrt{(W+E)} \quad (5)$$

其中: $Q$ 表示动作的二次型参数, $W$ 表示网络传播误差, $E$ 表示转子转速,在考虑网络更新速度下,对数据进行归一化处理<sup>[14]</sup>。按照自适应动态参数,在以一维状态为输入参数下,对网络参数进行设计,其参数配置如表1所示。

表1 网络参数

网络参数名称	名称	参数
Critic 网络	输入层节点	2
	隐层层数	2
	隐层节点	20
	输出层节点	2
	激活函数	Tanh
	学习率	0.002
Actor 网络	输入层节点	1
	隐层层数	2
	隐层节点	25
	输出层节点	2
	激活函数	Tanh
	初始学习率	0.000 2

按照网络参数，采用高斯函数，对隶属度函数进行确定，具体如式 (6) 所示：

$$R = K \cdot \frac{(T - Y)^2}{2I^2} \quad (6)$$

其中：T 表示模糊子集的中心，Y 表示分布宽度，I 表示隶属函数。

根据模糊化处理的结果对其进行模糊推理，使用模糊推理中的模糊交运算 (fuzzy AND) 和模糊或运算 (fuzzy OR) 来处理输入的隶属度值，假设输入变量为 x 和 y，模糊交是计算多个输入变量的隶属度值之间的交集的过程，模糊或是用于计算多个输入变量的隶属度值之间的并集的过程，具体如式 (7) 所示：

$$\begin{cases} I' = x \wedge y \\ I' = x \vee y \end{cases} \quad (7)$$

其中：I' 表示输出的隶属值，∧ 表示模糊交运算符，∨ 表示模糊并运算符。

去模糊化是将模糊输出转换为清晰的控制信号的过程，本文采用重心法来完成这一步操作。通过求解模糊输出与其隶属度函数之间的面积重心来确定控制信号，其数学表达式如式 (8) 所示：

$$E = \frac{\int x \cdot I' dx}{\int I' dx} \quad (8)$$

其中：E 表示涡轴航空发动机转速的模糊输出值。

将模糊子集的参数作为控制器的主要参数，形成涡轴航空发动机转速模糊控制器<sup>[15]</sup>，其结构如图 1 所示。

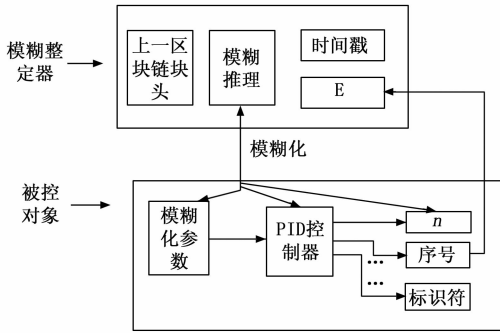


图 1 模糊控制器

再通过求解特征方程的根的方式，计算特征多项式的极点。将计算得到的极点进行归一化处理，将极点的数值范围映射到 [0, 1] 之间，以便更好地进行参数调整和优化。通过选择合适的三角形隶属度函数来表示参数，以此更准确地描述参数的取值范围和隶属度<sup>[16]</sup>。输入与输出的三角形隶属度函数如图 2 所示。

根据三角形隶属度函数的特性，可以在发动机切换时刻将飞行包线进行区域划分，并增加时间缓冲，这样做的目的是确保相邻模态控制器的凸组合成为主要模式，以实现平滑的过渡。对相等阶次的导数进行求解，通过对导数

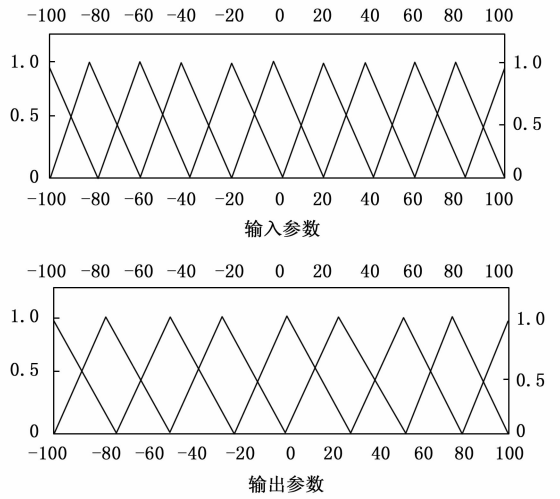


图 2 三角形隶属度函数

的计算，可以获得发动机状态的变化趋势，并据此进行相邻模态之间的缓冲控制。通过设置两个模态进行缓冲，可以将发动机状态输出状态进行一定程度的收敛，从而实现了对发动机转速进行自适应模糊控制。其缓冲控制如图 3 所示。

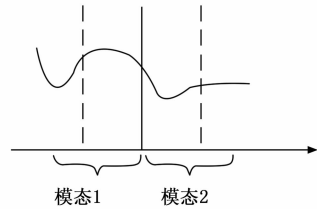


图 3 模态缓冲控制示意图

由图 3 可知，在发动机转速的自适应模糊控制中，这种缓冲和收敛的机制起到了关键作用。它能够平稳地调整模态之间的切换，避免突变和不稳定的情况出现。通过两个模态的缓冲，在过渡期间，可以逐步调整发动机控制信号，使其逐渐收敛到期望的状态<sup>[17]</sup>。

### 1.2 转速模糊控制系统结构

由前述模糊控制器构成转速模糊控制系统。发动机转速自适应模糊控制的关键在于如何根据实时的系统状态和外部干扰来调整模糊控制器的参数和规则，以适应不同的工作条件和环境变化<sup>[18]</sup>。本文根据模糊控制器结构，对发动机转速模糊控制系统的结构进行设计，其框架如图 4 所示。

在图 4 中，Memory 为具有存储功能的数据结构，用于存储过去的状态和经验，以便在需要时进行回顾和参考。Critic 网络用于评估当前状态和行动的效用值，根据从 Memory 输入的状态信息和选择的行动来计算对应的效用值，将符合效用值标准的数据输入到控制器局域网通信协议 CAN TJA 1040 和航空发动机中，将不符合效用值标准

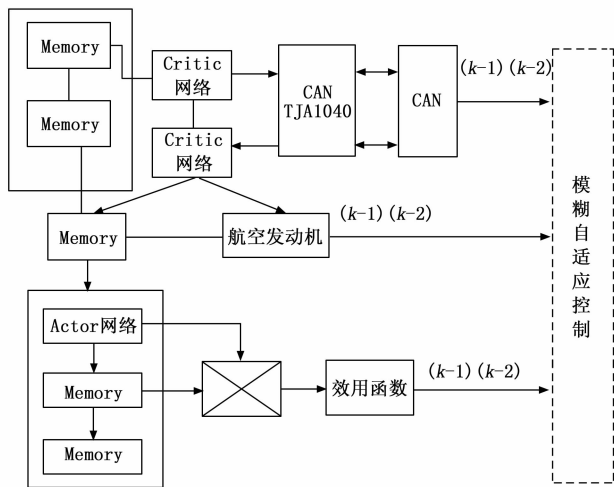


图 4 控制框架图

的数据输入到备用 Memory 模块中，以待传输至 Actor 网络。Actor 网络用于生成控制信号，即根据当前状态选择最佳的行动，它的输出作为控制器的指令汇总到新的 Memory 模块中，并构成效用函数。航空发动机和效用函数之间相互作用，再加上控制器局域网 CAN 和 CAN TJA 1040 之间进行的通信和数据交换，共同实现对发动机转速的自适应调节。

在此基础上，使用神经网络结构对发动机转速模型进行识别，得到的发动机转速的模型识别结构如图 5 所示。

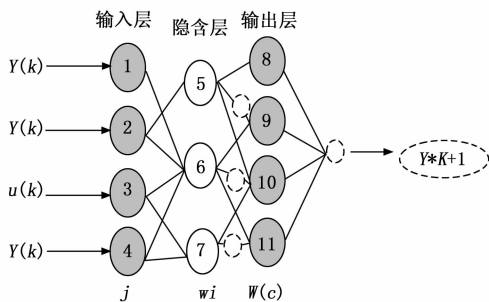


图 5 发动机转速的模型识别结构

由图 5 可知，该神经网络由输入层、隐含层和输出层共同构成。根据转速控制系统的特点，确定需要考虑的输入变量和输出变量，例如转速误差和转速变化率等。为每个输入变量和输出变量选择合适的隶属函数，如三角形、梯形或高斯函数等<sup>[19]</sup>。

### 1.3 控制规则及转速扭矩参数的调整

根据经验设计模糊规则，用以描述输入变量和输出变量之间的关系。为了将转速波动控制在较小的范围内，对变化率的调整规则进行设计，基于模糊控制器的参数，使用语言值来描述论域<sup>[20]</sup>。为了保证模糊子集能够更好地覆盖上述基本论域，同时减少所需的计算量，将模糊语言值设置为负较大 (DF)、负较小 (GH)、零 (Z)、正较小

(PS)、正较大 (CD) 5 种，即 {DF, GH, Z, PS, CD}，从而建立参数调整规则表，具体如表 2 所示。

表 2 参数调整规则表

EC	DF	GH	Z	PS	CD
DF	PS CD Z	CD Z	PS CD Z	DF Z	PS DF Z
GH	DF Z	DF Z	DF Z	DF CD Z	PS DF Z
Z	CD Z	DF PS Z	DF Z	DF CD PS	DF CD
PS	DF PS	PS Z DF	DF PS	CD DF	DF CD DF
CD	PS Z	PS Z	DF	DF CD PS	DF Z

按照调整规则表，可以建立两个规则，具体如下：当隶属函数中的参数取较大值时，系统的快速跟踪性能将得到加强，此时应选择较小的模糊推理值；而当隶属函数中的参数取较小值时，系统的快速跟踪性能将会降低，故此时应选择较大的模糊推理值。按照这两个规则，得到其自整定数值的关系图，具体如图 6 所示。

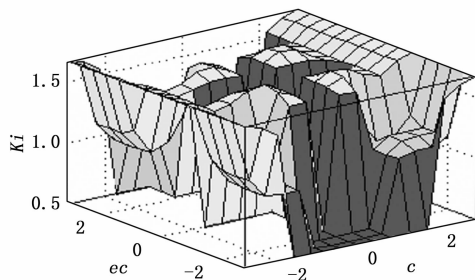


图 6 模糊自整定数值关系图

在涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制中，调整发动机转速扭矩参数是一个重要的步骤，它可以对转速控制系统的性能和稳定性产生显著影响。发动机转速扭矩参数是用于描述发动机输出扭矩与转速之间的关系参数，不同的发动机转速扭矩参数可以对发动机的响应速度、稳定性和能耗等方面产生不同的影响。故在本小节中，首先通过 1.1 小节设计的模糊控制器，对发动机转速扭矩参数进行调整。

按照模糊自整定数值关系，进行模糊推理，得到其调整后的输出量，具体如式 (9) 所示：

$$O = \sum P \cdot (z + x) \tag{9}$$

其中：P 为调整规则下的转变参数，z 为反函数，x 为偏差函数，从而得到调整后的发动机转速扭矩参数 g，具体如式 (10) 所示：

$$g = (O - v) + \left[ \frac{1}{k} \times (n + m) \right] \tag{10}$$

其中：v 为模糊子集的中心元素，k 为集合的分辨率，n 为发动机扭矩的时间，m 为网络时间延时，从而得到调整后的发动机转速扭矩参数。

通过以上步骤，可以设计出一个完整的模糊控制器，用于实现涡轴航空发动机转速的自适应调节。在实际应用

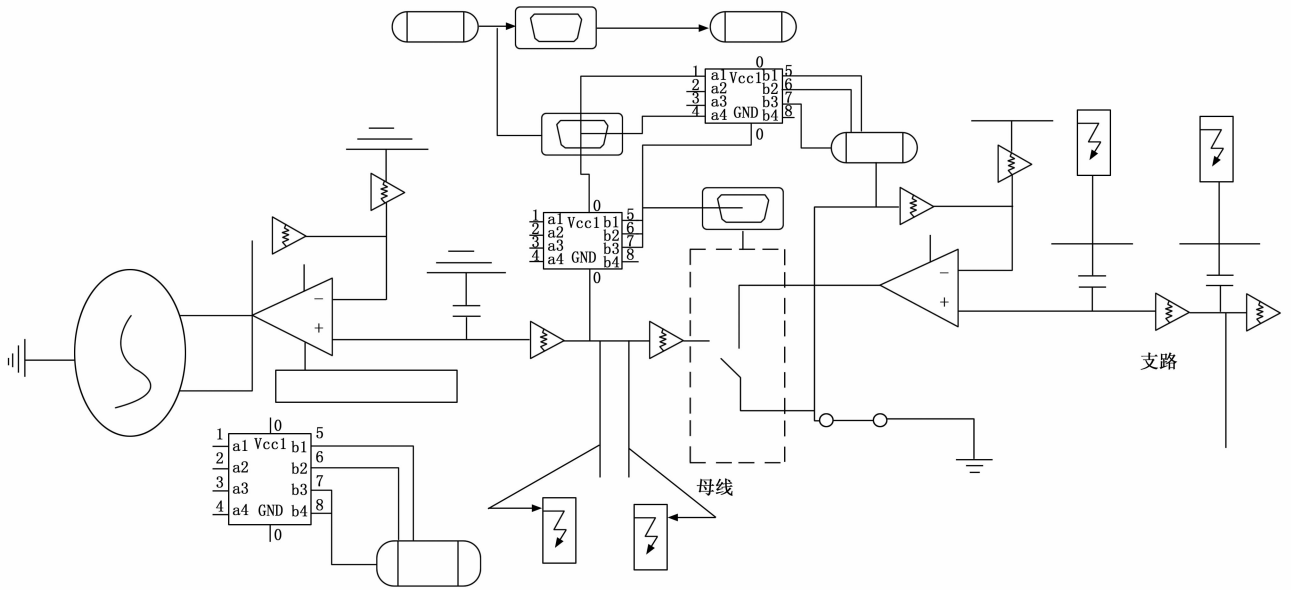


图 7 模糊控制器仿真模型

中,还可以根据需要对模糊控制器进行进一步的优化和调整,以满足具体的转速控制要求。

## 2 仿真实验与分析

通过仿真实验可以验证和评估所提出的自适应模糊控制方法的性能和有效性,进一步了解涡轴航空发动机的转速特性。在本节中,将介绍所进行的仿真实验以及对仿真结果的分析,旨在验证和评估涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制方法的性能。

### 2.1 仿真实验模型

首先,建立一个涡轴航空发动机的仿真实验模型。该模型包括发动机的结构、传动系统、控制器以及与之相关的传感器和执行器。为了模拟真实的工作环境,考虑发动机的非线性特性、外部干扰以及参数变化等因素,采集了涡轴航空发动机的转速数据,并结合其他关键参数,如油门开度、环境温度等,以获得全面的仿真数据。使用 Matlab/Simulink 平台,进行仿真实验。

根据模糊规则表,选用 Simulink 构建发动机的数学模型,并通过本文所述方法调整参数,设计模糊控制器仿真模型,如图 7 所示。

设置其发动机转速模型参数,其参数如表 3 所示。

表 3 发动机转速模型参数

参数	数值
发动机排量/L	1.5
发动机惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.6
歧管体积/L	2.5
环境压力/Pa	10 520 000
环境温度/K	250
气体常数/(kg·K)	267
节气门直径/mm	44

以所建立的模型为基础,调整参数,进而展开仿真实验与结果分析。

### 2.2 仿真实验参数

设置仿真实验的控制器参数,并按照公式计算其参数,如表 4 所示。

表 4 仿真实验的控制器参数

内环控制器参数	数值	外环控制器参数	数值
输出饱和参数 $r_1$	$1 \times 10^{-9}$	目标进气压力	1
输出饱和参数 $r_2$	$5 \times 10^{-9}$	负载补偿	0.5
设计参数 $k_1$	$1 \times 10^{-12}$	速度补偿	30
设计参数 $k_2$	$1 \times 10^{-15}$	滑模抗干扰项	$1 \times 10^{-15}$

对模型的输入、输出参数,进行归一化处理,对变量采用三角形隶属度函数,在此基础上,使用 3 种控制方法设置对比实验,并对以上控制参数进行验证。使用本文设计方法为实验组,以基于模糊误差判断算法的涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制方法为对比方法一,以基于平滑切换策略的涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制方法为对比方法 2,对仿真实验结果进行统计与分析,具体如下所示。

### 2.3 仿真结果与分析

基于前述仿真实验模型和参数,应用本文方法、文献 [6] 中的基于平滑切换策略的航空发动机转速调节控制方法、文献 [8] 中的基于 RBF 神经网络补偿的航空发动机自适应控制方法 3 种方法对涡轴航空发动机转速控制效果进行验证,仿真实验每次进行 26 s,其中,前 20 s 为未应用任何方法进行控制的状态,在 20 s 后分别应用 3 种方法进行控制。

首先,应用本文设计方法,验证其对涡轴航空发动机

转速的控制效果，具体控制结果如图 8 所示。

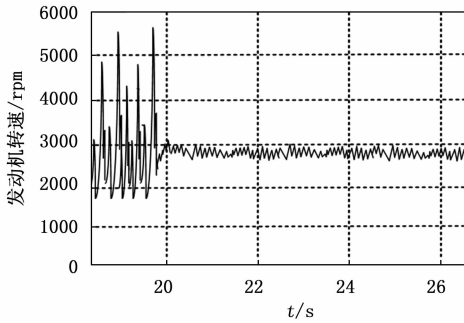


图 8 本文设计方法转速控制效果

从图 8 中可以看出，在未施加任何方法对涡轴航空发动机转速进行控制的前 20 s 内，发动机转速变化幅度较大，通常在 2 000~5 500 rpm 之间振荡变化。在应用本文设计方法后，能够较好地将涡轴航空发动机转速控制在 3 000 rpm 附近小波动振荡，说明在使用本文设计的方法对发电机进行转速控制后，其转速的波动得到了有效的控制，由此初步证明本文方法对涡轴航空发动机转速的控制效果较好。

接着，应用文献 [6] 方法，验证其对涡轴航空发动机转速的控制效果，得到其对发电机的转速控制情况，具体如图 9 所示。

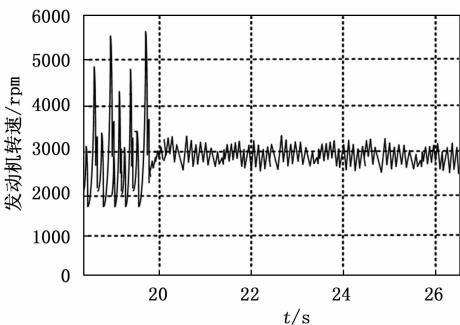


图 9 文献 [6] 方法转速控制效果

从图 9 中可以看出，在应用了文献 [6] 方法之后，涡轴航空发动机的转速得到了一定的控制，相对比控制之前波动明显减小，能够保证在 3 000 rpm 附近波动，但相比于本文方法的应用效果而言，其波动幅度稍大，说明发电机转速在一定程度上得到了控制，但控制效果总体一般。

最后，应用文献 [8] 方法进行仿真实验，验证其对涡轴航空发动机转速的控制效果，得到其对发电机的转速控制情况，具体如图 10 所示。

从图 10 中可以看出，在应用文献 [8] 方法之后，涡轴航空发动机的转速得到了一定的控制，相对比控制之前波动明显减小，总体维持在 2 000~3 500 rpm 之间波动，但相比于本文方法和文献 [6] 方法的应用效果而言，其波动幅度更大，说明其虽然对涡轴航空发动机转速进行了控

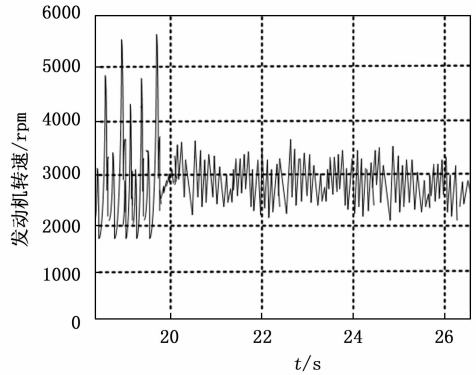


图 10 文献 [8] 方法转速控制效果

制，但控制效果较差。

对以上结果进行综合分析，可以得到当阶跃干扰为 10 N·m 时，随着时间的增加，其转速的波动情况如表 5 所示。

表 5 阶跃干扰为 10 N·m 转速波动情况

时间/s	转速波动/rpm		
	本文设计方法	文献[6]方法	文献[8]方法
20	11.38	39.28	77.72
22	16.33	33.52	77.93
24	15.14	35.19	79.55
26	14.15	33.13	75.39
28	12.25	33.33	77.17
30	14.25	35.23	73.52
32	17.77	39.25	75.19
34	16.52	39.43	77.17
36	14.15	33.32	77.77
38	15.67	35.39	75.23
40	14.25	33.13	77.56

当阶跃干扰为 15 N·m 时，其转速的波动情况如表 6 所示。

表 6 阶跃干扰为 15 N·m 转速波动情况

时间/s	转速波动/rpm		
	本文设计方法	文献[6]方法	文献[8]方法
20	11.69	39.39	79.25
22	12.51	33.52	79.43
24	15.52	35.19	77.72
26	16.32	33.13	75.39
28	15.12	33.33	77.17
30	14.29	35.23	77.75
32	12.36	39.25	77.93
34	14.35	39.43	79.52
36	17.81	33.32	75.39
38	16.50	35.39	77.17
40	14.28	33.13	77.75

根据表 5 和表 6 中的数据，首先，当阶跃干扰为 10 N·m 时，在本文设计方法的应用下，随着时间的增加，发动机

转速的波动相对较小。平均而言,转速波动在 11.38~17.77 rpm 之间。而文献 [6] 和 [8] 的方法在同样的阶跃干扰下,转速波动较大,分别在 33.13~39.43 rpm 和 73.52~79.55 rpm 之间。这表明本文设计的自适应模糊控制方法,在阶跃干扰为 10 N·m 时,能够将转速波动保持在较小的范围内,更有效地控制发动机转速。接下来,当阶跃干扰为 15 N·m 时,本文设计方法的应用在这种情况下仍然能够有效地控制发动机转速,转速波动的平均值在 11.69~17.81 rpm 之间,相对较小。而文献 [6] 方法和文献 [8] 方法的转速波动分别在 33.13~39.43 rpm 和 75.39~79.55 rpm 之间。由此说明,在阶跃干扰为 15 N·m 时,本文设计的自适应模糊控制方法仍能够保持转速波动在较小的范围内。

综合以上仿真实验结果,可以得出以下结论:本文设计的自适应模糊控制方法在不同阶跃干扰下,相对于文献 [6] 方法和文献 [8] 方法,能够更好地控制涡轴航空发动机的转速,并将转速波动情况维持在较小的范围内。这表明本文设计的自适应模糊控制方法具有较好的性能和稳定性,可应用于实际的涡轴航空发动机转速控制系统中。

### 3 结束语

本文针对涡轴航空发动机转速控制问题,进行了自适应模糊控制的研究。通过设计模糊控制器、调整发动机转速扭矩参数以及引入自适应机制,实现了对涡轴航空发动机转速的自适应模糊控制,并对其性能进行了仿真实验与分析。通过仿真实验与分析,验证了所提出的自适应模糊控制方法的性能和有效性。仿真结果表明,相比于对比方法,本文设计的自适应模糊控制方法在不同阶跃干扰下能够更好地控制发动机转速,并将转速波动情况维持在较小的范围内。这证明了该方法在涡轴航空发动机转速控制中具有较好的适应能力和稳定性。然而,本研究还存在一些局限性。首先,对于发动机转速的自适应模糊控制,未来仍可以进一步改进和优化模糊控制器的设计和参数调整方法;其次,在本次研究的仿真实验中,目前只考虑了特定的工况和干扰情况,未来的研究可以进一步扩展实验范围并开展实际应用测试,考虑更多的实际工况和环境因素。希望本研究的成果能够对相关领域的学者和工程师提供有益的指导和启发,推动涡轴航空发动机转速控制技术的进一步发展与应用。

#### 参考文献:

- [1] 徐亦卿, 陆海澎. 基于扩张状态观测器的发动机转速双闭环自适应控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (7): 123-128.
- [2] 毋本鑫, 施进发, 杨杰, 等. 智能牵引机动力系统功率匹配与自适应控制 [J]. 液压与气动, 2022, 46 (3): 70-79.
- [3] 侯 虞, 谭建国, 刘 瑶, 等. 基于线性遗传规划的航空发动机 NO<sub>x</sub> 排放开环控制 [J]. 推进技术, 2023, 44 (2):

289-295.

- [4] 刘露杨, 郭迎清, 杨闻浩, 等. 基于 H<sub>∞</sub> 回路成形的变循环发动机多变量控制 [J]. 航空发动机, 2023, 49 (1): 139-144.
- [5] 赵静怡, 石 岩, 吴玉虎, 等. 基于平滑切换策略的航空发动机转速调节控制设计 [J]. 推进技术, 2022, 43 (4): 332-339.
- [6] 赵静怡, 石 岩, 吴玉虎, 等. 基于平滑切换策略的航空发动机转速调节控制设计 [J]. 推进技术, 2022, 43 (4): 337-344.
- [7] 陈 勇, 蔡开龙. 基于模糊误差判断算法的航空发动机 PID 控制 [J]. 自动化仪表, 2021, 42 (4): 73-76.
- [8] 薛红阳, 蔡开龙, 李黄琪, 等. 基于 RBF 神经网络补偿的航空发动机 H<sub>∞</sub> 自适应控制研究 [J]. 航空工程进展, 2023, 14 (1): 128-134.
- [9] 蔡常鹏, 郑前钢, 颜秋英, 等. 军用小涵道比涡扇发动机最大状态控制计划鲁棒性分析 [J]. 推进技术, 2022, 43 (5): 310-317.
- [10] 宋恩哲, 蒋中州, 姚 崇, 等. 船用柴油/天然气双燃料发动机模式切换控制策略研究 [J]. 中国机械工程, 2022, 33 (4): 388-396.
- [11] 聂卫健, 邓旺群, 皮滋滋, 等. 民用涡轴发动机动力涡轮盘破裂转速研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2022, 34 (5): 33-38.
- [12] 李 俊, 任 冲, 樊国旗, 等. 基于模糊控制的高占比风电系统自适应虚拟惯量及调频参数补偿策略研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42 (4): 55-61.
- [13] 郑俊超, 罗艺伟, 唐海龙, 等. 自适应循环发动机模式转换过渡态控制规律设计方法研究 [J]. 推进技术, 2022, 43 (11): 44-53.
- [14] 廖子豪, 宾光富, 李 超, 等. 基于临界转速与振型相似的涡轴发动机模拟转子实验台设计方法 [J]. 机械设计, 2021, 38 (6): 45-50.
- [15] 樊智勇, 冯丹琳, 刘 涛. 面向飞行仿真的涡扇发动机转速工程模型研究 [J]. 计算机仿真, 2020, 37 (1): 31-34.
- [16] 宋明波, 严 平, 王 旭, 等. 基于适航要求的某涡轴发动机最大不平衡探索 [J]. 航空动力学报, 2023, 38 (6): 1467-1473.
- [17] 熊文羽, 王树林, 叶 杰, 等. 增程器用天然气发动机转速双闭环自适应控制 [J]. 控制与决策, 2020, 35 (7): 1623-1630.
- [18] 王鸿鹏, 段发阶, 蒋佳佳, 等. 基于非谐波傅里叶变换的发动机转速测量系统 [J]. 电力电子技术, 2020, 54 (4): 57-60.
- [19] 韩涛翼, 李纪永, 赵 彧, 等. 高转速涡轮发动机转子临界转速计算 [J]. 西北工业大学学报, 2021, 39 (s1): 47-53.
- [20] 朱日兴, 白 杰, 王 伟. 航空发动机转速传感器失效下转速限制保护的 control 方法 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (34): 14308-14312.