

基于模糊推理的液体火箭发动机 推力室减损控制研究

程玉强, 魏鹏飞, 吴建军

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 在建立液体火箭发动机动力学模型、推力室冷却夹套隔片结构模型和材料损伤模型的基础上, 利用模糊逻辑推理知识设计了模糊推理机, 构建了模糊减损控制系统这一有机整体。通过仿真计算, 在火箭发动机工作 100s 期间, 推力室喷管冷却夹套隔片有一定变形的情况下, 研究了其损伤演化过程及损伤分布。

关键词: 液体推进剂火箭发动机; 冷却夹套隔片; 减损控制; 模糊逻辑

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2005)03-0009-05

Research of damage mitigating control of thrust chamber based on fuzzy logic reasoning for liquid propellant rocket engine

Cheng Yuqiang, Wei Pengfei, Wu Jianjun

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of
Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: Based on the model of liquid rocket engine dynamic, the model of the coolant channel ligament and damage model of material, fuzzy-logic controller is designed. Thus, all the models make up of the integer-fuzzy-logic damage control system. The simulations of the damage distribution of the stained coolant channel are shown after the engine works 100s. The damage distribution and growth are studied.

Key words: liquid propellant rocket engine; coolant channel ligament; damage mitigating control; fuzzy logic

收稿日期: 2005-04-30; 修回日期: 2005-05-25; 基金项目: 国家自然科学基金(50276068)

作者简介: 程玉强(1979—), 男, 博士生, 研究领域为可重复使用液体火箭发动机延寿控制技术。

1 引言

当今世界，航天技术发展迅猛，随着人类航天活动的日益增加和对宇宙空间不断深入的科学探索，人们迫切需提高航天器及其推进系统的性能、可靠性与安全性。为了提高发动机系统可靠性、可用性、可维护性以及增强部件耐用性等，如何减损、估计和延长其寿命是一个必须解决的关键技术问题。

减损控制技术基本含义是通过减少工作发动机中关键部件上的损伤来达到延长系统的工作寿命的目的^[3,4]。液体推进剂火箭发动机关键部件的损伤程度直接影响液体推进剂火箭发动机的正常工作寿命，推力室作为液体推进剂火箭发动机的关键部件之一，喷管冷却夹套隔片又是推力室损伤、破坏，发生危险的集中区域。如果能够准确的了解冷却夹套隔片的损伤分布，并对损伤严重的地方采取适当的控制措施进行减损控制，这对延长发动机寿命及提高发动机系统可靠性、可用性以及增强部件耐用性都有重要意义。本文就针对喷管冷却夹套隔片这一易损部件构建了模糊减损控制系统。

2 模糊减损控制系统

图 1 是基于模糊逻辑推理设计的一种闭环减损控制系统的整体结构简图，图中给出了该系统的基本组成模块。即系统动力学模型、结构模型、损伤模型、性能调节器和模糊减损控制器。

其中系统动力学模型、结构模型和损伤模型是系统中的被控对象。性能控制器是控制的载体，通过它实现对系统动力学性能的控制输入优化。参考信号生成器是产生稳定的系统稳态工况时的状态信号，可避免由于转工况引起的短时间的状态扰动，从而造成减损控制器的不稳定性。基于模糊逻辑推理的减损控制器可以在系统性能和关键部件损伤之间做出适当的权衡，以达到减损的目的。

液体火箭发动机动力学模型见参考文献[1]，结构模型和损伤模型见参考文献[2,5]，性能调节是液体火箭发动机所具有的能力，参考信号生成

器根据模糊控制输出直接给出发动机稳态性能值。下面着重讲一下基于模糊推理的推理机的设计。

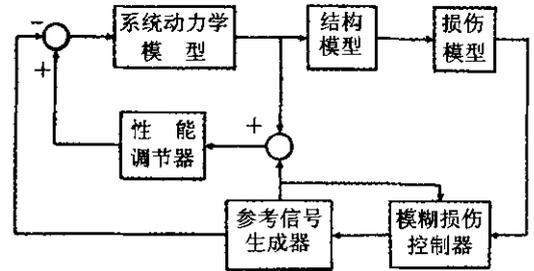


图 1 基于模糊推理的减损控制系统示意图

Fig.1 Schematic of damage mitigating control system based on fuzzy-reasoning

3 减损控制系统的模糊推理过程

模糊推理系统的基本结构如图 2 所示。模糊推理系统具有精确的输入和输出，它完成了输入空间到输出空间的非线性映射，对任意的输入，模糊控制器均能给出合适的控制输出。

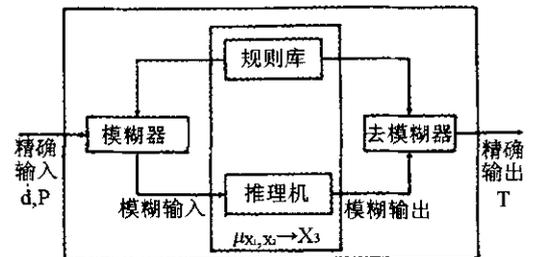


图 2 模糊推理系统

Fig.2 Fuzzy-reasoning system

3.1 模糊化运算

在模糊控制中，对输入数据进行模糊化是必不可少的一步。在进行模糊化运算之前，首先要对输入量进行尺度变换，使其变换到相应的论域范围^[6]。减损控制器有两个精确的输入，即发动机性能值和隔片的损伤变化率，由于损伤变化率是小量，为了增加控制器灵敏度，取常用对数形式对损伤变化率进行尺度变换。即对于精确的输入 d_0^* 取常用对数后变为

$$\dot{d}_0 = \log(\dot{d}_0^*)$$

输入量进行尺度变换后，进行语言变量的划分，将损伤变化率划分为“低”、“正常”、“高”、“非常高”4个等级；把性能分为“低”、“偏低”、“中等”、“偏高”、“高”5个等级。把输出量推进剂流量控制阀门位置分为“低”、“偏低”、“中等”、“偏高”、“高”5个等级。其对应论域：损伤变化率域、性能域和推进剂流量控制阀门位置域，及其论域上的隶属函数表示见图3和图4。分析损伤变化率和性能两个输入量和推进剂流量控制阀门位置输出量时，本文选取了三角形模糊产生器。图3给出了损伤变化率取常用对数的隶属函数，图4给出了性能隶属函数和推进剂流量控制阀门位置隶属函数，性能P和推进剂流量控制阀门位置C，在不影响控制效果的情况下，为了简化控制法则，保持一致。

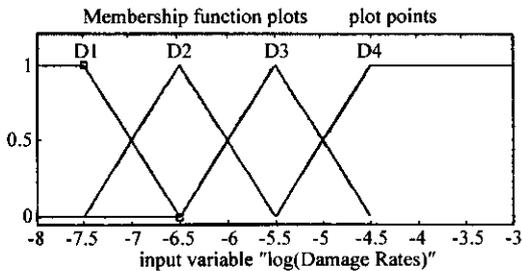


图3 损伤变化率隶属度函数

Fig.3 Damage rate membership functions

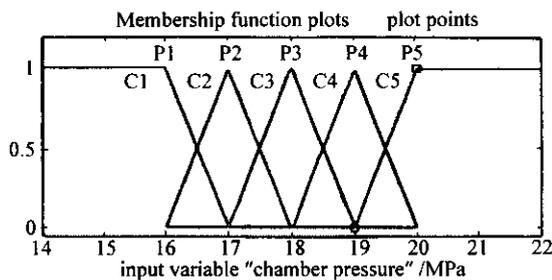


图4 性能隶属度函数

Fig.4 Performance membership functions

3.2 模糊控制规则库

模糊控制规则库是由一系列“IF-THEN”型的模糊条件句所构成。条件句的前件为输入和状态，即损伤变化率和性能；后件为控制变量，即性能

调节量。本文采用了基于专家经验的方法建立模糊规则库。

表1 模糊控制规则表

Tab.1 Rules of fuzzy controller

	D1	D2	D3	D4
P1	T5	T4	T3	T1
P2	T5	T4	T3	T1
P3	T5	T3	T2	T1
P4	T5	T3	T2	T1
P5	T5	T3	T1	T1

根据图3、图4中隶属度函数，定义了 $N = 4 \times 5$ 条模糊控制规则：

Rule1 : if D1 and P1 then T5;

M

Rule20 if D4 and P5 then T1;

表1给出了模糊规则。现以第一条规则解释其表示的含义，即如果损伤变化率常用对数是低值，且发动机处于低性能状态，那么，可以将控制阀门调节到大值，提高火箭发动机性能。

3.3 输出去模糊化

通过表1模糊规则库推理得到的结果是模糊量，而实际的控制规则为确定量，因此需要将模糊量转换成确定量。对火箭发动机性能调节主要是通过控制预燃室前氧化剂控制阀门位置和燃烧室前氧化剂控制阀门位置进行，本文将这两个阀门位置结合起来，用数对的形式表示，即

(预燃室前氧化剂控制阀门位置，燃烧室前氧化剂控制阀门位置)。

根据热试车或液体火箭发动机动力学仿真结果，可以确定一系列控制阀门与火箭发动机性能对应的一组值，我们按性能增大的顺序排列控制阀门的位置。选择能够较大改变性能值的控制阀门位置，设为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) 和 (x_5, y_5) 五个确定的数对。

则输出量模糊集合可表示为

$$C(c) = \frac{\mu_1}{(x_1, y_1)} + \frac{\mu_2}{(x_2, y_2)} + \frac{\mu_3}{(x_3, y_3)} + \frac{\mu_4}{(x_4, y_4)} + \frac{\mu_5}{(x_5, y_5)}$$

其中， $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$ 表示输出量在不同

阀门位置的隶属度。利用最大隶属度法，找到输出量最大的隶属度函数值，发动机控制阀门就调节到对应的位置，求得清晰控制输出值。

4 模糊减损控制仿真

针对火箭发动机推力室喷管处为压坑矩形槽结构的冷却通道（见图 5），本文分别仿真了冷却通道隔片在初始有较小和较大变形两种情况下，当火箭发动机工作 100s 后，在使用减损控制及未使用减损控制时，隔片损伤量的分布情况。

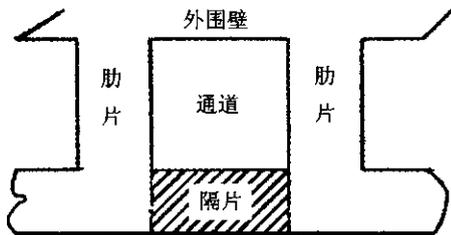


图 5 冷却夹套隔片示意图

Fig.5 Schematic of coolant channel ligament

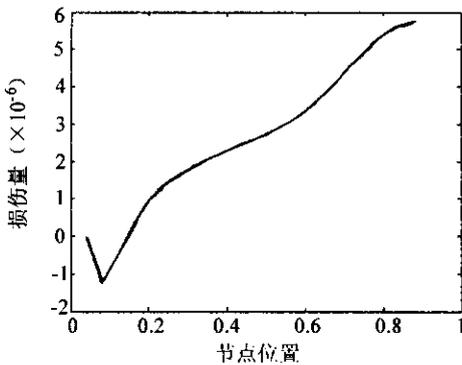


图 6 采用减损控制器隔片损伤分布

Fig.6 Damage distribution of ligament with damage-mitigating controller

图 6 给出了隔片初始有较小变形的情况下，采用减损控制器工作 100s 后，隔片损伤分布的情况，损伤量最大值在隔片中央，最大值为 5.7×10^{-6} 。图 7 给出了同样条件下，未采用减损控制器，隔片的损伤分布的情况，损伤最大值在隔片中央，最大值为 1.7×10^{-5} 。比较两个损伤量

可知，采用减损控制器损伤减少了 66.5%。图 8 给出了隔片初始有较大变形情况下，采用减损控制器，工作 100s 后，隔片损伤分布的情况，损伤量最大值出现在隔片中央，最大值为 3.65×10^{-5} 。图 9 给出了同样条件下，未采用减损控制器，隔片的损伤分布情况，损伤最大值在隔片中央，最大值为 4.78×10^{-5} 。比较两个损伤量可知，采用减损控制器损伤减少了 23.6%。

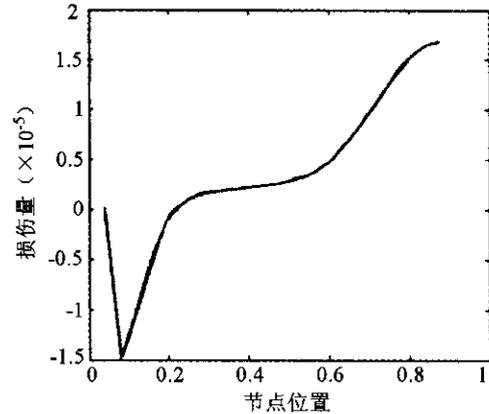


图 7 未采用减损控制器隔片损伤分布

Fig.7 Damage distribution of ligament without damage-mitigating controller

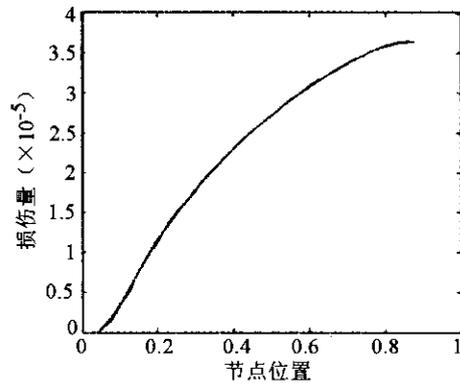


图 8 采用减损控制器隔片损伤分布

Fig.8 Damage distribution of ligament with damage-mitigating controller

比较两种情况可知，隔片变形越小，损伤变化率就越小，减损控制器所起的减损作用越明显；反之，隔片变形越大，损伤变化率越大，减损控制器所起减损的效果越不明显。因此，对推力室隔片的损伤要早发现、早控制。

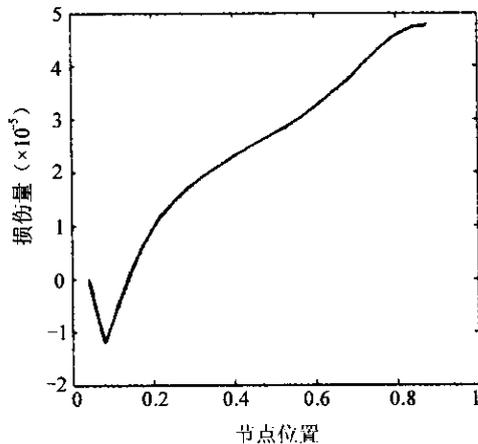


图 9 未采用减损控制器隔片损伤分布

Fig.9 Damage distribution of ligament without damage-mitigating controller

5 小结

本文仿真了两组推力室喷管处冷却夹套隔片有一定初始变形的情况下，采用和不采用减损控制器，工作 100s 后，隔片损伤分布的情况，并对比每种情况下隔片损伤量最大值得出下面两个结论：

(1) 对比推力室喷管处冷却夹套隔片有一定初始变形情况下，当发动机工作 100s 后，采用和不采用模糊减损控制器时，隔片上各节点损伤分布情况，可以得出，当隔片有一定初始变形情况下，模糊减损控制器的减损效果是显著的；

(2) 对比推力室喷管处冷却夹套隔片有较小

和较大初始变形情况下，采用模糊减损控制器，当发动机工作 100s 后，隔片上各节点损伤分布情况，可以得出，隔片初始变形越小，模糊减损控制器起的作用越明显。

参考文献：

- [1] Asok Ray, Min-Kuang Wu, et al. Damage-mitigating control of mechanical systems: Part II-formulation of an optional policy and simulation [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. Vol.116 September, 1994.
- [2] Xiaowen Dai, Asok Ray. Life prediction of the thrust chamber wall of a reusable rocket engine [J]. Journal of Propulsion and Power Vol.11, No.6 November-December, 1995.
- [3] 吴建军, 魏鹏飞. 液体火箭发动机智能减损控制技术 [J]. 推进技术, 2003. 24(6) 484~487.
- [4] Michael Holms, Asok Ray. Fuzzy damage mitigating of mechanical structures [C]. Conference on Decision & Control. San Diego, California, USA, December, 1997.
- [5] Porowski J S, O' Donnell W J, Badlani M L, Kasraie B. Simplified design and life prediction of rocket thrust chambers [J]. Journal of Spacecraft 1985. Vol.22, March-April, pp. 181-187.
- [6] 汤兵勇, 路林吉, 王文杰. 模糊控制理论与应用技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

(编辑: 王建喜)