

文章编号: 1001-2486 (2002) 01-0005-04

分级燃烧循环发动机变工况的模糊控制*

黄敏超, 刘 昆

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 研究了一种模糊控制方法, 并用于分级燃烧循环液体火箭发动机变工况过程的反馈控制。仿真研究表明: 在抑制参数抖振方面, 模糊控制优于一般的变结构控制。

关键词: 液体推进剂火箭发动机; 动态过程; 模糊控制

中图分类号: V434 文献标识码: A

Fuzzy Control in Changing Conditions for Staged Combustion Cycle Engine

HUANG Min-chao, LIU Kun

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A fuzzy control is studied, which is used for the feedback control in the changing condition process of the staged combustion cycle liquid rocket engine. Simulation research has shown that the fuzzy sliding mode control surpasses usual variable structure control in weakening chattering.

Key words: liquid propellant rocket engine; dynamic process; fuzzy control

近年来, 模糊控制引起控制科学工作者的兴趣, 并发展成为智能控制的一个重要分支。对于像分级燃烧循环液体火箭发动机这样的大型复杂技术动态系统, 其部件相互耦合, 输入与输出之间表现为本质非线性关系, 很难对其数学模型进行直接分析, 同样也很难实现其反馈控制。而模糊控制无需解析模型, 对于复杂的工业过程具有良好的适应性和鲁棒性^[1,2], 使得模糊控制理论发展迅速。

1 发动机数学模型

分级燃烧循环发动机达到稳定状态以后, 可以通过新增的控制回路来调节其推力大小。由于预燃室是富氧燃烧, 使得流量调节器的燃料流量大小直接影响预燃室的燃气温度, 预燃室燃气温度又影响涡轮的做功能力, 而涡轮的做功能力影响离心泵出口的压力、燃烧室的压力, 这样通过调节流量调节器的燃料流量可以改变发动机工作状态, 进而控制发动机的推力。

流量调节器的动态方程为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F - k_t x - F_0 - \text{sign}\left(\frac{dx}{dt}\right) \cdot \left(C_g \frac{dx}{dt} + F_{mp}\right) \quad (1)$$

式中 x 为滑阀的位移, m 为阀芯质量, F_0 为初始弹簧力, k_t 为弹簧刚度, C_g 为动态阻力系数, F_{mp} 为弹簧静摩擦力, $F = f'(X, u)$ 为控制力。

若令 $dx/dt = x_n$, $x = x_{n-1}$, x_1 , x_2 , ..., x_{n-2} 表示其它发动机状态变量, 则分级燃烧循环发动机的动态方程可以表示为

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad x \in R^n \quad (2)$$

$$m \frac{dx_n}{dt} = f'(X, u) - k_t x_{n-1} - F_0 - \text{sign}(x_n) \cdot (C_g x_n + F_{mp}) \quad (3)$$

* 收稿日期: 2001-11-10
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59886003)
作者简介: 黄敏超 (1969—), 男, 讲师, 博士。

式中 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, u 是控制变量, 表示为

$$u = c_1 + c_2 \alpha = c_1 + c_2 f_u(c(X - X_d)) \quad (4)$$

式中 c, c_1, c_2 为常数, X_d 为期望向量, α 是电机转动角度, $f_u(\cdot)$ 是控制结构函数。

2 模糊控制器

设 s 上任意正区间 $[a_0, a_n]$, 其中 $a_n > a_0 > 0$, 在该区间上分 $n+1$ 个模糊集合 A_i ($i = 0, 1, \dots, n$), 取三角形隶属函数 (图1), 并设第 i 个模糊集合的中心点为

$$a_i = \frac{i}{n} r^{n-i} (a_n - a_0) + a_0 \quad (5)$$

式中 $r \in (0, 1]$, 当 $r = 1$ 时, 即为线性划分。

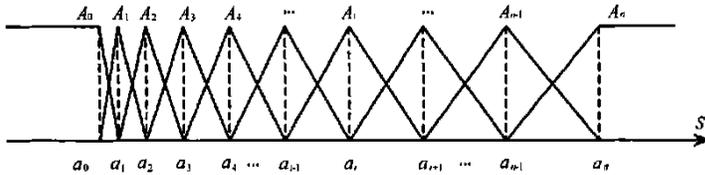


图1 非线性划分模糊区间

Fig. 1 Nonlinear partitioning of fuzzy interval

模糊集合 A_0 的隶属函数为

$$\mu_{A_0}(s) = \begin{cases} 1.0, & s < a_0 \\ \frac{a_1 - s}{a_1 - a_0}, & a_0 \leq s \leq a_1 \\ 0.0, & s \geq a_1 \end{cases} \quad (6)$$

模糊集合 A_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) 的隶属函数为

$$\mu_{A_i}(s) = \begin{cases} \frac{s - a_{i-1}}{a_i - a_{i-1}}, & a_{i-1} \leq s \leq a_i \\ \frac{a_{i+1} - s}{a_{i+1} - a_i}, & a_i \leq s \leq a_{i+1} \\ 0.0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

模糊集合 A_n 的隶属函数为

$$\mu_{A_n}(s) = \begin{cases} 1.0, & s \geq a_n \\ \frac{s - a_{n-1}}{a_n - a_{n-1}}, & a_{n-1} \leq s < a_n \\ 0.0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

从 (6)、(7) 和 (8) 式可知, 对于同一 s 有

$$\mu_{A_{i-1}}(s) + \mu_{A_i}(s) = 1 \quad (9)$$

控制规则形式为

$$\text{if } s(X, t) \text{ is } A_i \text{ then } u = b_i > 0, s \in [a_0, a_n]$$

在某一时刻, 只有两条规则被激活, 采用重心法进行模糊判决, 得到 $[a_0, a_n]$ 的反馈控制变量

$$u(s) = - \frac{\sum_{i=0}^n b_i \mu_{A_i}(s)}{\sum_{i=0}^n \mu_{A_i}(s)} = - (b_{i-1} \mu_{A_{i-1}}(s) + b_i \mu_{A_i}(s)) \quad (10)$$

对于 $a_0 < a_n < 0$ 时, $s < 0$, $[a_0, a_n]$ 的反馈控制变量为

$$u(s) = b_{i-1} \mu_{A_{i-1}}(|s|) + b_i \mu_{A_i}(|s|) \quad (11)$$

因此 $[a_0, a_n]$ ($0 < a_0 < a_n$ 或 $a_0 < a_n < 0$) 的反馈控制变量为

$$u(s) = - (b_{i-1} \mu_{A_{i-1}}(|s|) + b_i \mu_{A_i}(|s|) \text{sign}(s)) \frac{\Delta}{s} - u_s(|s|) \text{sign}(s) \quad (12)$$

如果在 s 轴上划分了几个区间, 则所有区间的反馈控制变量为

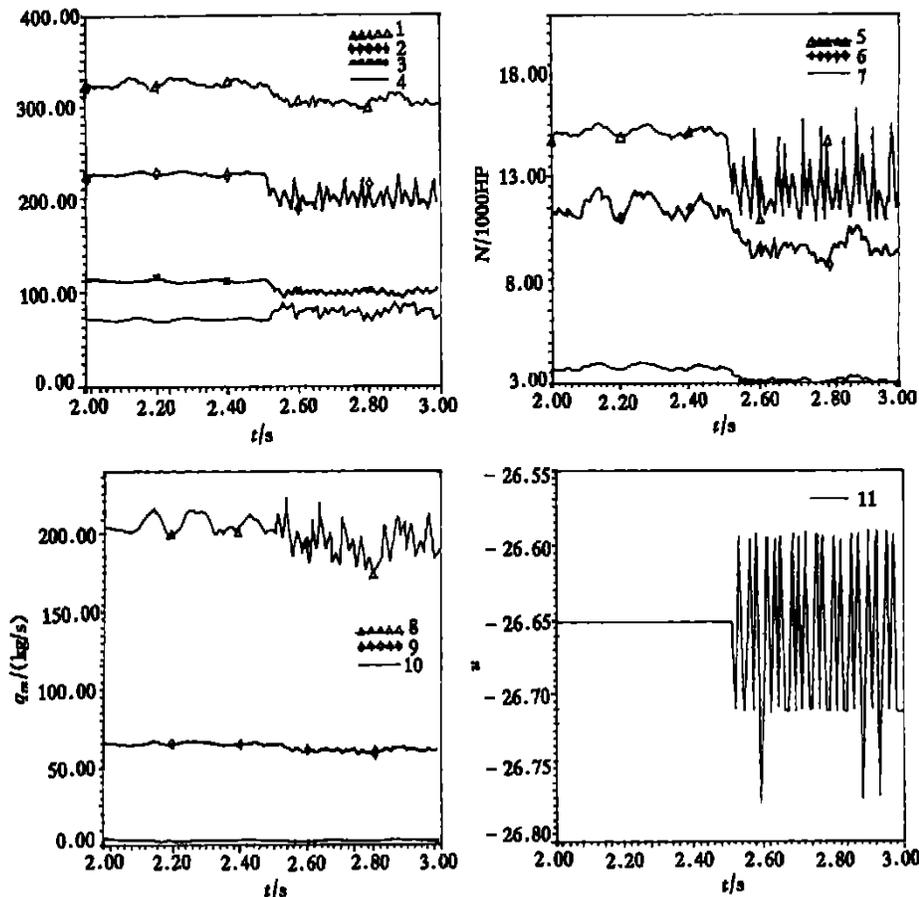
$$u(s) = \begin{cases} -u_{s0}(|s|) \text{sign}(s), & a_0^0 \leq |s| < a_n^0 \\ -u_{s1}(|s|) \text{sign}(s), & a_0^1 \leq |s| < a_n^1 \\ \dots \\ -u_{sm}(|s|) \text{sign}(s), & a_0^m \leq |s| < a_n^m \end{cases} \quad (13)$$

3 仿真研究

在实际仿真研究中, 选用涡轮转速 n 、预燃室压力 p_{gg} 和燃烧室压力 p_c 作为被跟踪的工作参数, 定义切换函数为

$$s = \frac{n - n_d}{3n_0} + \frac{p_{gg} - p_{ggd}}{3p_{gg0}} + \frac{p_c - p_{cd}}{3p_{c0}} \quad (14)$$

式中 n_0, p_{gg0}, p_{c0} 分别为其相应工作参数的额定值。



1- 涡轮泵转速(45r/min), 2- 燃烧室压力(0.1MPa), 3- 预燃室压力(0.1MPa), 4- 混合比, 5- 涡轮功率, 6- 氧化剂泵功率, 7- 燃料泵功率, 8- 氧化剂流量, 9- 燃烧室燃料流量, 10- 预燃室燃料流量, 11- 反馈控制变量。设置发动机变工况从 2.5s 开始。

图 2 采用普通变结构控制的发动机变工况过程

Fig. 2 Engine changing conditions by usual variable structure control

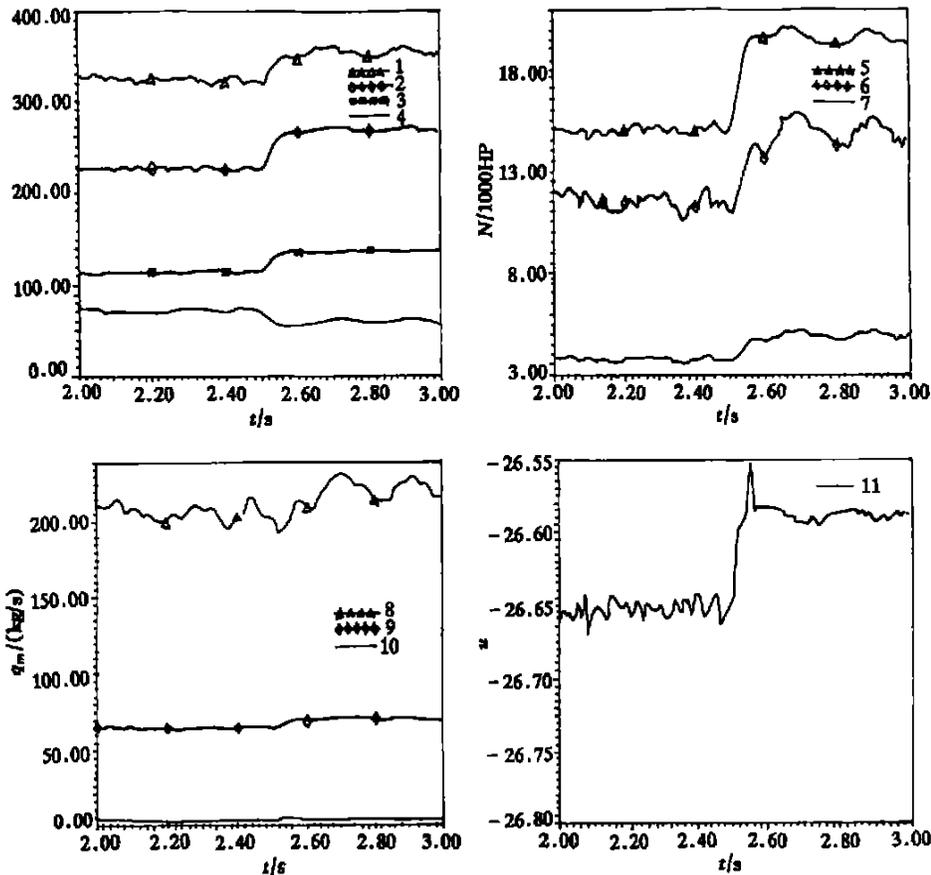
图 2 表示分级燃烧循环发动机采用了普通变结构控制的变工况过程。从图中知, 由于变结构控制的固有特性, 使得发动机工作参数出现了明显的振动, 这也正是变结构控制需要重点解决的问题。

图 3 表示采用模糊控制增加发动机预燃室燃料流量以后, 使得发动机工况升高, 从而增加了发动机

推力。从图中知,发动机从2.5s开始转工况以后,其工作参数并没有出现剧烈的抖振,说明模糊控制可以有效地削弱滑动模态控制引起的抖振。此外,对于发动机的推力控制,无论是增加还是减少,都必须首先满足流量调节器的调节范围,如果一个流量调节器满足不了要求,可以考虑同时并联两个相同的流量调节器。

本文对涡轮泵转动惯量变化50%~150%、流量调节器滑阀质量改变50%~150%和弹簧刚度改变50%~150%时的分级燃烧循环发动机变工况过程进行了仿真。对于发动机相同的期望变工况过程,虽然发动机的特性参数不同,但由于采用了模糊控制,使得工作参数的动态变化基本一致,表现出较强的容错性,这样使得加工等因素引起涡轮泵转动惯量、流量调节器滑阀质量及弹簧刚度变化的影响得以控制。

从以上仿真研究可知,采用模糊控制可以有效地实现对分级燃烧循环发动机工况的在线控制,并且增加发动机工作过程的容错性,从而提高发动机工作的可靠性。另外,由于模糊控制无需解析模型,若在发动机试验过程能获得一定的试车数据,同样可以建立分级燃烧循环发动机在线实时模糊控制系统。



1- 涡轮泵转速(45r/min), 2- 燃烧室压力(0.1MPa), 3- 预燃室压力(0.1MPa), 4- 混合比, 5- 涡轮功率, 6- 氧化剂泵功率, 7- 燃料泵功率, 8- 氧化剂流量, 9- 燃烧室燃料流量, 10- 预燃室燃料流量, 11- 反馈控制变量。

图3 采用模糊控制的发动机变工况过程

Fig. 3 Engine changing conditions by fuzzy control

参考文献:

- [1] Hwang C L, Kuo C Y. A stable adaptive fuzzy sliding-mode control for affine nonlinear systems with application to four-bar linkage systems [J]. IEEE Trans. Fuzzy Syst., 2001, 9(2): 238- 252.
- [2] Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems [J]. IEEE Trans. Fuzzy Syst., 1993, 1: 464- 472.