

固体推进剂的模糊综合评判

钱 有 林

摘 要

在固体火箭发动机总体设计任务中,选择固体推进剂是十分重要的一项。推进剂选择得是否合适,不但影响到发动机的战术技术性能,而且影响到发动机的经济性、安全性和贮存性能等一系列的问题。在众多的推进剂牌号中,要想选择一种最为理想的推进剂并不容易,往往难以决策。本文用模糊综合评判法对推进剂进行多因素综合评定,并提出了根据加权综合评判结果之和的最大值来选择最佳推进剂的构想,从而达到既经济、又迅速、又正确地选择最佳推进剂的目的。

主题词: 1.固体推进剂-优选法 2.模糊数学-应用

一、引 言

不同使命的发动机对固体推进剂有着不同的特殊要求。虽然不同情况下考虑的侧重面不同,但是,一般来说在选择推进剂时需要综合考虑推进剂的能量水平、燃烧性能、力学性能和生产工艺性能等。

但是由于推进剂性能之间是互相联系又互相制约的,所以往往不能十全十美,而可能各有所长。因此设计者有时要采用折衷的办法来选择推进剂。如果有若干种推进剂,它们的主要性能指标基本上都能满足设计要求,横向比较,又难舍难取,如何选取其中最为理想的一种推进剂呢?在这种情况下,最好还是用若干种推进剂在同一实验发动机上做试验,根据实测的试验数据再作取舍。但这样既不经济,又延长了研制周期。而如果运用本文所提供的用模糊综合评判法对推进剂进行多因素综合评判,就可以较好地解决此问题。

二、推进剂的多因素模糊综合评判

固体推进剂的性能对发动机的性能乃之火箭或导弹的性能有着决定性的影响。对于型号来说,可以根据一系列具体的战术技术要求和和其他有关要求来研制新的推进剂。但是对于多数情况来说,则是在现有的可供使用的推进剂中选择最为理想的推进剂。

现假设给定两个有限论域:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$$

$$V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_m\}$$

其中 U 代表综合评判的因素所组成的集合,而 V 则代表由评语所组成的集合。

对于任意一种推进剂而言,根据本文前面的论述,假设只考虑九个因素,即能量性能,内弹道性能、燃烧温度、临界压力、力学性能、热安定性和贮存安定性、危险性、特殊性能、价格等,由此组成论域:

$U = \{\text{能量性能}(u_1), \text{内弹道性能}(u_2), \text{燃烧温度}(u_3), \text{临界压力}(u_4), \text{力学性能}(u_5), \text{热安定性和贮存安定性}(u_6), \text{危险性}(u_7), \text{特殊性能}(u_8), \text{价格}(u_9)\}$ 。

假设评语只考虑四种等级，即很好、较好、一般、不好。由此组成评语论域：

$$V = \{\text{很好}(v_1), \text{较好}(v_2), \text{一般}(v_3), \text{不好}(v_4)\}。$$

为了对若干种推进剂的各种因素进行综合评判，可以采取用户问卷调查的方法，也可采取请有关专家评判的办法。

现对某一种推进剂，如果仅就能量性能(u_1)来说，请一些专家对此进行评判。结果假如有50%的人认为该推进剂用在所研制的发动机上“很好”，有35%的人认为“较好”，有15%的人则认为“一般”，没有人认为“不好”的。因此该种推进剂对能量性能的单因素评判结果为 $\tilde{R}_1$ ：

$$\tilde{R}_1 = (r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14}) = (0.50, 0.35, 0.15, 0)$$

用上述方法对内弹道性能进行评判，于是得到内弹道性能单因素评判结果 $\tilde{R}_2$ 为：

$$\tilde{R}_2 = (r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{24}) = (0.27, 0.41, 0.32, 0)$$

同理可以列出其他单因素的评判结果：

$$\tilde{R}_3 = (r_{31}, r_{32}, r_{33}, r_{34}) = (0, 0.25, 0.45, 0.30)$$

$$\tilde{R}_4 = (r_{41}, r_{42}, r_{43}, r_{44}) = (0.51, 0.37, 0.12, 0)$$

$$\tilde{R}_5 = (r_{51}, r_{52}, r_{53}, r_{54}) = (0.12, 0.50, 0.31, 0.07)$$

$$\tilde{R}_6 = (r_{61}, r_{62}, r_{63}, r_{64}) = (0.13, 0.35, 0.40, 0.12)$$

$$\tilde{R}_7 = (r_{71}, r_{72}, r_{73}, r_{74}) = (0.09, 0.27, 0.51, 0.13)$$

$$\tilde{R}_8 = (r_{81}, r_{82}, r_{83}, r_{84}) = (0, 0.13, 0.42, 0.45)$$

$$\tilde{R}_9 = (r_{91}, r_{92}, r_{93}, r_{94}) = (0.11, 0.32, 0.49, 0.08)$$

以上九个单因素评判结果就构成了一个模糊矩阵，即单因素评判矩阵 $\tilde{R}$ ：

$$\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{9 \times 4} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} \\ r_{71} & r_{72} & r_{73} & r_{74} \\ r_{81} & r_{82} & r_{83} & r_{84} \\ r_{91} & r_{92} & r_{93} & r_{94} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.50, 0.35, 0.15, 0 \\ 0.27, 0.41, 0.32, 0 \\ 0, 0.25, 0.45, 0.30 \\ 0.51, 0.37, 0.12, 0 \\ 0.12, 0.50, 0.31, 0.07 \\ 0.13, 0.35, 0.40, 0.12 \\ 0.09, 0.27, 0.51, 0.13 \\ 0, 0.13, 0.42, 0.45 \\ 0.11, 0.32, 0.49, 0.08 \end{pmatrix}$$

由于各种固体火箭发动机的任务、使用环境、发射方式以及数量等各不相同，所以不同的发动机对上述诸因素的要求也不尽相同。例如，战略导弹上的固体火箭发动机所用的推进剂，只要性能有微小的改善，都会对射程产生不可忽视的影响。因此在这一种情况下，对推进剂的能量性能、内弹道性能、力学性能等方面提出更高的要求，放到更重要的地位，而对推进剂的价格等放到次要的地位。又如，野战火箭上的发动机所使用的推进剂，虽然也希望它的能量指标尽量的高，临界压力尽量的低等，但并不一定将其放到首位。由于火箭消耗量

大和其他一些原因,因此更希望推进剂的原料来源丰富、立足国内、制造容易、安全可靠、长期贮存、价格低廉等。再如,空对空导弹上的火箭发动机所使用的推进剂,往往强调无烟,以防载机发动机因呛烟而停车;要求燃气对金属无腐蚀性,安全可靠和长期贮存等。总之,不同的固体火箭发动机,对推进剂的各种因素有着不同的要求,强调的重点不同。因此根据不同发动机给予不同的权重,就建立了权重分配模糊集 $\tilde{A}$ 。 $\tilde{A}$ 为论域 U 上的一个模糊子集。

对某固体火箭发动机而言,推进剂的九个因素分别给予了不同的权重,其权重分配模糊集 $\tilde{A}$ 为:

$$\begin{aligned}\tilde{A} &= (a_{ik})_{1 \times 9} = (a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}, a_{16}, a_{17}, a_{18}, a_{19}) \\ &= (0.20, 0.15, 0.07, 0.08, 0.13, 0.09, 0.11, 0.12, 0.05)\end{aligned}$$

于是由模糊变换

$$\tilde{B} = \tilde{A} \cdot \tilde{R}$$

得到某推进剂的综合评判结果 $\tilde{B}$:

$$\begin{aligned}\tilde{B} = \tilde{A} \cdot \tilde{R} &= (0.20, 0.15, 0.07, 0.08, \\ &\quad 0.13, 0.09, 0.11, 0.12, 0.05) \cdot \begin{pmatrix} 0.50, 0.35, 0.15, 0 \\ 0.27, 0.41, 0.32, 0 \\ 0, 0.25, 0.45, 0.30 \\ 0.51, 0.37, 0.12, 0 \\ 0.12, 0.50, 0.31, 0.07 \\ 0.13, 0.35, 0.40, 0.12 \\ 0.09, 0.27, 0.51, 0.13 \\ 0, 0.13, 0.42, 0.45 \\ 0.11, 0.32, 0.49, 0.08 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&= (b_{ij})_{4 \times 4} = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}) \\ &= (0.20, 0.20, 0.15, 0.12)\end{aligned}$$

$$\text{式中 } b_{ij} = \bigvee_{k=1}^9 (a_{ik} \wedge r_{kj})$$

$$i = 1$$

$$j = 1, 2, 3, 4$$

由于 $\tilde{B}$ 值是根据最大、最小运算而得到的,所以最后还需要归一化处理。

$$\text{因 } 0.20 + 0.20 + 0.15 + 0.12 = 0.67$$

所以用0.67除 $\tilde{B}$ 中各项,得到归一化后的综合评判结果 $\tilde{B}$ 为

$$\tilde{B} = (0.30, 0.30, 0.22, 0.18)$$

$\tilde{B}$ 是论域 V 上的一个模糊子集。

以上就是对某推进剂的评判结果。在同时考虑了该推进剂的多种因素后,仍是“很好”和“较好”两项占的比重最大(占60%)。这说明该推进剂对所设计的发动机来说是比较适合的,有可能被选中。但究竟能否被选中,还得看有没有比该推进剂更好的推进剂。因此要对其他若干种候选推进剂也作同样的综合评判,再根据评判结果择优选取。

三、最佳推进剂的选取

如果可供选择的推进剂较多,各种推进剂的各个因素之间又相差不大,这样必然使综合评判结果很接近,但又互相交错,此时究竟选哪一种推进剂好仍然难于决策。在这一种情况下建议计算“加权综合评判结果之和” W 值,对应于最大 W 值的推进剂即为最佳推进剂。

对评语赋予不同的权重,然后将权重 C_i 和对应的评判结果 b_{ij} 相乘再求和,即可得到 W 值,所以

$$W = \sum_{j=1}^4 C_j b_{ij}$$

式中 C_j 为对应于评语 V_j 的权重。

现对七种推进剂进行了模糊综合评判,其结果如下:

$$\begin{aligned} B_1 &= (0.30, 0.30, 0.22, 0.18) \\ \widetilde{B}_2 &= (0.34, 0.40, 0.20, 0.06) \\ \widetilde{B}_3 &= (0.20, 0.31, 0.35, 0.14) \\ \widetilde{B}_4 &= (0.32, 0.50, 0.10, 0.08) \\ \widetilde{B}_5 &= (0.35, 0.25, 0.30, 0.10) \\ \widetilde{B}_6 &= (0.32, 0.45, 0.13, 0.10) \\ \widetilde{B}_7 &= (0.28, 0.59, 0.13, 0) \end{aligned}$$

由上可见,仍然难于判明哪一种最好。

如果评语的权重分配为:

评 语 (v_j)	很 好 (v_1)	较 好 (v_2)	一 般 (v_3)	不 好 (v_4)
权 重 (C_j)	0.14 (C_1)	0.30 (C_2)	0.20 (C_3)	0.10 (C_4)

于是

$$\begin{aligned} W_1 &= C_1 b_{11} + C_2 b_{12} + C_3 b_{13} + C_4 b_{14} \\ &= 0.40 \times 0.30 + 0.30 \times 0.30 + 0.20 \times 0.22 + 0.10 \times 0.18 \\ &= 0.12 + 0.09 + 0.044 + 0.18 = 0.272 \end{aligned}$$

同理

$$\begin{aligned} W_2 &= 0.136 + 0.12 + 0.04 + 0.006 = 0.302 \\ W_3 &= 0.08 + 0.093 + 0.07 + 0.014 = 0.257 \\ W_4 &= 0.128 + 0.15 + 0.02 + 0.008 = 0.306 \\ W_5 &= 0.14 + 0.075 + 0.06 + 0.01 = 0.285 \\ W_6 &= 0.128 + 0.135 + 0.026 + 0.01 = 0.299 \\ W_7 &= 0.112 + 0.177 + 0.026 + 0 = 0.315 \end{aligned}$$

由以上计算结果可见, $W_7 = W_{\max}$ 。因此 W_7 所对应的第七种推进剂为最佳。用上述方法就可以在众多的推进剂中选取能最大限度地满足发动机设计要求的推进剂,而不必耽心漏掉最佳推进剂。

四、结 束 语

在参加候选的若干种固体推进剂的各种因素足够具全, 足够精确; 参加评判的人数较多, 且他们都具有代表性, 权威性和实践经验; 对所设计的发动机的任务、环境、特点以及对推进剂的特殊要求等等深入了解的情况下, 运用模糊综合评判法对推进剂进行多因素综合评判, 其结果是正确的, 可信的。

参 考 文 献

- (1) 钱有林, 徐万赋: 固体火箭发动机。中国人民解放军炮兵技术学院, 1985.2。
- (2) 张吉瑞, 叶庆棠, 王天佑等译: 固体火箭发动机设计基础。兵器工业部第210研究所, 1982.10。
- (3) 贺仲雄: 模糊数学及其应用。天津科学技术出版社, 1984。

~~~~~  
(上接第21页)

### 参 考 文 献

- (1) Lilley, D.G., Swirling flows in typical combustor geometries. Paper No. AIAA-85-0184, AIAA 23rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, January 14—17, 1985.
- (2) Ecudier, M.P., Keller, J.J., Recirculation in swirling flow; a manifestation of vortex breakdown. AIAA Journal, Vol 23, No.1, 1985, pp111-116.
- (3) Buckley, P.L., Graig, R.R., Davis, D.L. and Schwartzkopf, K.G., The design and combustion performance of practical swirlers for integral rocket/ramjets. Paper No. AIAA-80-1119, AIAA/SAE/ASME 16th joint Propulsion Conference, Hartford, Connecticut, June 30-July 2, 1980.
- (4) 司徒明, 李光明, 王振夷, 刘兴洲: 旋流-突扩燃烧室冷态流场研究。《推进技术》, 1986年第6期。
- (5) Schetz, J.A., Hewitt P.W. and Thomas, R., Swirl combustor flow visualization studies in a water tunnel. Paper No. AIAA-82-1238.
- (6) Habib, M.A., Whitelaw, J.H., Velocity characteristics of confined jets with and without swirl. Paper No. ASME 79-WA/FE-21, ASME Winter Annual Meeting, December 1979.
- (7) Roback, R. and Johnson, B.V., Mass and momentum turbulent transport experiments with confined swirling co-axial jets. NASA Report CR-168252, August 1983.
- (8) Vu, B.T. and Gouldin, F.C., Flow measurements in a model swirl flow. AIAA Journal, Vol. 20, 1982, PP. 652—659.
- (9) Ramos, J.I. and Somer, H.T., Swirling flow in a research combustor. AIAA Journal, Vol. 23, No. 2, 1985.