

# 飞机环控/发动机系统多目标决策研究

李洪波<sup>1</sup>, 董新民<sup>1</sup>, 李婷婷<sup>2</sup>, 郭 军<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学工程学院, 西安 710038; 2. 飞行自动控制研究所, 西安 710065)

**摘 要:** 提出一种两阶段多目标决策方法, 应用于飞机环控/发动机系统的多目标决策分析。将起飞、加速爬升和高空超音速巡航阶段的总熵产最小视为不同目标函数以建立多目标优化模型, 采用多目标优化算法得到非劣最优解集。在此基础上进行方案初选, 利用改进综合权重的 Vague 集决策方法对备选方案进行模糊评价和优选, 并找到最终解。计算结果验证了该方法的合理性。

**关键词:** 环境控制系统; 发动机系统; 多目标决策; Vague 集; 熵权

## Study on Multi-objective Decision of Aircraft Environmental Control System and Engine

LI Hong-bo<sup>1</sup>, DONG Xin-min<sup>1</sup>, LI Ting-ting<sup>2</sup>, GUO Jun<sup>1</sup>

(1. Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

**【Abstract】** A two-phase multi-objective decision method is proposed to the multi-objective decision of aircraft environmental control system and engine. The total entropy generation minimum at flight phases of take-off, climb and supersonic penetration are regarded as different objective, the multi-objective optimization model is established. The Pareto optimal set is obtained by multi-objective optimization algorithm. Based on the Pareto optimal set the scheme primary selection is done, and it evaluates the selected scheme through Vague set decision-making method with improved integrated weight, the final optimal scheme is obtained. Results validates the rationality of the method.

**【Key words】** Environmental Control System(ECS); engine system; multi-objective decision; Vague set; entropy weight

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.24.086

### 1 概述

在对飞机系统进行综合优化方面, 文献[1-3]将传统的基于能量守恒定律的分析方法和基于热力学第二定律的最小熵产分析方法进行比较, 指出后者在飞机系统优化分析时的先进性和合理性。以总熵产最小为目标函数, 分别在起飞、加速爬升和高空超音速巡航阶段对环控系统和发动机系统进行综合优化分析。

考虑到在不同飞行阶段为使总熵产减小对所选设计变量的要求不同, 甚至存有冲突, 引入多目标优化思想。将不同飞行阶段总的熵产最小视为不同目标函数建立多目标优化模型, 采用后验优先权方法, 即先利用多目标优化方法求得非劣最优解集, 然后进行方案评价与优选。

在信息熵和 Vague 集的基础上, 本文提出一种两阶段多目标决策方法。采用连接法进行方案集初选, 利用改进综合权重的 Vague 集决策方法实现对备选方案的模糊评价。

### 2 飞机环控/发动机系统多目标优化模型

本文以典型升压式环控系统和混合排气加力涡扇发动机系统为研究对象。考虑到目前多目标优化方法在处理高维多目标问题时的局限性<sup>[4]</sup>, 以及飞行阶段的代表性等因素, 本文选取飞行任务剖面内的起飞、加速爬升和高空超音速巡航 3 个阶段为设计点, 将各阶段环控和发动机系统总的熵产最小视为不同目标函数, 建立多目标优化模型。

按照气流在系统部件间的流动过程, 分别计算系统工作时各部件熵产<sup>[5]</sup>, 系统熵产为部件熵产之和。故发动机系统熵产为:

$$S_{PS} = S_{diff} + S_{fan} + S_{com} + S_{burn} + S_{mix1} + S_{Htu} + S_{mix2} + S_{Ltu} + S_{mix} + S_{aburn} + S_{unbu} \quad (1)$$

环控系统熵产为:

$$S_{ECS} = m_b [c_p \ln(T_{out}/T_{in}) - R \ln(P_{out}/P_{in})] + m_r [c_p \ln(T_{rout}/T_{rain}) - R \ln(P_{rout}/P_{rain})] \quad (2)$$

其中, 下标 *diff*、*fan* 等分别表示发动机系统部件; *b*、*r* 分别表示环控引气和冲压空气; *out*、*in* 表示出口和入口。环控系统和发动机系统总的熵产为:

$$S_{TOTAL} = S_{PS} + S_{ECS} \quad (3)$$

选取的环控系统设计变量为初级热交换器和次级热交换器效率  $\eta_p$ 、 $\eta_s$ , 流比  $\mu_p$ , 压气机和涡轮压力比  $\pi_c$ 、 $\pi_t$ , 引气流量  $m_s \beta$ ; 发动机系统设计变量为涵道比 *B*, 风扇和高压压气机压力比  $\pi_{cl}$ 、 $\pi_{ch}$ , 涡轮入口温度  $T_4$ 。设计变量须满足的不等式约束为:  $0.8 \leq \eta_p \leq 0.95$ ,  $0.8 \leq \eta_s \leq 0.95$ ,  $1 \leq \pi_c \leq 4.5$ ,  $1.5 \leq \pi_t \leq 5$ ,  $1.15 \leq \mu_p \leq 4$ ,  $0 < \beta \leq 0.01$ ,  $0.2 \leq B \leq 0.8$ ,  $3 \leq \pi_{cl} \leq 6$ ,  $3 \leq \pi_{ch} \leq 6$ ,  $1600 \leq T_4 \leq 2000$ 。

假设气体是一维定常流动的完全气体, 气流经过发动机进气道、风扇、高压压气机、涡轮和尾喷管时具有各自气体

**基金项目:** 航空科学基金资助项目(2008ZC01006)

**作者简介:** 李洪波(1981—), 男, 博士, 主研方向: 多目标决策; 董新民, 教授、博士生导师; 李婷婷, 工程师、硕士; 郭 军, 博士

**收稿日期:** 2011-06-23 **E-mail:** lhbfirst-81@163.com

参数, 经过燃烧室和混合器时气体参数是变化的; 假设环控系统任何部件工作时都不与外界换热, 并且不考虑管道内气流的温度和压力变化。气流在发动机系统和环控系统部件间流动满足的转换关系, 即系统的气动热力计算关系见文献[6-7], 在此不再赘述。

综上所述, 多目标优化模型为:

$$\begin{aligned} \min \quad & S_{TOTAL} = \{S_{TOTAL-TO}, S_{TOTAL-CL}, S_{TOTAL-SP}\} \\ \text{w.r.t} \quad & \{\eta_p, \eta_s, \pi_c, \dots, B, \pi_{cl}, \pi_{ch}, T_4\} \\ \text{s.t.} \quad & \bar{H} = 0, \bar{G} \leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 下标  $TO$ 、 $CL$  和  $SP$  分别表示起飞、加速爬升和高空超音速巡航阶段;  $\bar{H}$  表示等式约束, 主要指气流在系统部件间的转换关系;  $\bar{G}$  表示不等式约束, 主要包括设计变量的取值范围和部件熵产非负限制。

采用多目标粒子群优化算法对模型进行求解, 得到非劣最优解集, 然后在此基础上进行方案决策。

### 3 两阶段多目标决策方法

#### 3.1 方案初选

多目标优化计算得到的非劣解数量较大, 一方面意味着挑选最终方案的范围大, 另一方面也会使分析和计算量增加。为此, 先采用连接法对备选方案进行初选, 即对表征方案的每个指标提供一个合适的满意值, 只有当方案的每个属性值均不劣于对应的满意值时该方案才被保留。

#### 3.2 熵权法确定客观权重

熵权法借助信息熵对系统内在信息描述的客观性, 根据方案集构成的判断矩阵来计算各指标的差异程度, 从而确定客观权重的大小<sup>[8]</sup>。具体步骤为:

首先构建具有  $n$  个方案  $m$  个评价指标的评价矩阵  $B = (b_{ij})_{n \times m}$ ,  $i \in [1, n]$ ,  $j \in [1, m]$ , 经规范化处理将评价矩阵  $B$  转化为  $[0, 1]$  范围内的相对优属度矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。然后计算评价指标  $j$  的熵值  $H_j$ :

$$f_{ij} = r_{ij} / \sum_{k=1}^n r_{kj} \quad (5)$$

$$H_j = -\frac{1}{\ln n} \left( \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad (6)$$

为使  $\ln f_{ij}$  有意义, 当  $f_{ij} = 0$  时, 令  $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。在此基础上, 为克服原有熵权辨识尺度问题, 文献[9]提出一种改进熵权计算公式:

$$\begin{aligned} wp_j^1 &= (1 - H_j) / \sum_{k=1, H_k \neq 1}^m (1 - H_k) \\ wp_j^2 &= (1 - (H_j - \bar{H}_\Theta)) / \sum_{k=1, H_k \neq 1}^m (1 - (H_k - \bar{H}_\Theta)) \\ w_{oj}' &= \begin{cases} (1 - \bar{H}_\Theta) \times wp_j^1 + \bar{H}_\Theta \times wp_j^2 & \text{if } H_j < 1 \\ 0 & \text{else if } H_j = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $\bar{H}_\Theta$  表示不等于 1 的各指标熵值的均值;  $w_{oj}'$  即为由信息熵确定的客观权重。

#### 3.3 综合权重的改进

本文根据所选取的 3 个飞行阶段在飞行剖面内代表的飞行时间长短给出主观权重  $w_s$ , 并结合熵权法确定的客观权重计算各属性的综合权重。常见的一种综合权重计算方法为:

$$w_j = \frac{w_{sj} \times w_{oj}}{\sum_{j=1}^m (w_{sj} \times w_{oj})} \quad (8)$$

该方法计算简单, 但是却可能会使得到的综合权重不符

合决策者的意图。为此, 提出一种加权几何平均数方法计算综合权重<sup>[10]</sup>:

$$w_j = \frac{(w_{sj})^\alpha \times (w_{oj})^\beta}{\sum_{j=1}^m [(w_{sj})^\alpha \times (w_{oj})^\beta]} \quad (9)$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  为 2 种权重在决策者心目中的比重。改进的综合权重能够更加准确地刻画各属性在决策过程中的重要程度。

#### 3.4 Vague 集多目标评价模型

方案集的优属度矩阵为  $R = (r_{ij})_{n \times m}$ , 则正理想方案可表示为:  $R^+ = (r_1^+, r_2^+, \dots, r_m^+)$ ; 负理想方案可表示为:  $R^- = (r_1^-, r_2^-, \dots, r_m^-)$ , 其中,  $r_j^+ = \max_{i=1 \dots n} (r_{ij})$ ,  $r_j^- = \min_{i=1 \dots n} (r_{ij})$ 。令  $r_{ij}$  相对于正理想方案指标  $r_j^+$  的 Vague 值为  $[t_{ij}^+, 1 - f_{ij}^+]$ 。假定当  $r_{ij} = r_j^+$  时,  $r_{ij}$  对于  $r_j^+$  的真隶属度为  $t_{ij}^+ = 1$ , 假隶属度为  $f_{ij}^+ = 0$ ; 随着  $r_{ij}$  逐渐远离  $r_j^+$ ,  $t_{ij}^+$  逐渐减小,  $f_{ij}^+$  逐渐增大; 当  $r_{ij} = r_j^-$  时,  $r_{ij}$  对于  $r_j^+$  的真隶属度为  $t_{ij}^+ = 0$ , 假隶属度为  $f_{ij}^+ = 1$ 。定义  $r_{ij}$  相对于正理想方案指标  $r_j^+$  的真假隶属度计算方法为:

$$t_{ij}^+ = \frac{r_{ij} - r_j^-}{r_j^+ - r_j^-} \quad (10)$$

$$f_{ij}^+ = 1 - \frac{r_{ij} - r_j^-}{r_j^+ - r_j^-} = \frac{r_j^+ - r_{ij}}{r_j^+ - r_j^-}$$

同理,  $r_{ij}$  相对于负理想方案指标  $r_j^-$  的真假隶属度为:

$$t_{ij}^- = \frac{r_j^+ - r_{ij}}{r_j^+ - r_j^-} \quad (11)$$

$$f_{ij}^- = 1 - \frac{r_j^+ - r_{ij}}{r_j^+ - r_j^-} = \frac{r_{ij} - r_j^-}{r_j^+ - r_j^-}$$

然而必须认识到在决策问题中, 接近正理想方案并不意味着同时远离负理想方案。

为此, 综合考虑  $r_{ij}$  相对于正理想方案  $r_j^+$  和负理想方案  $r_j^-$  的隶属度, 计算  $r_{ij}$  相对于理想方案的综合 Vague 隶属度为:

$$t_{ij} = t_{ij}^+ \times f_{ij}^- = \left( \frac{r_{ij} - r_j^-}{r_j^+ - r_j^-} \right)^2 \quad (12)$$

$$f_{ij} = f_{ij}^+ \times t_{ij}^- = \left( \frac{r_j^+ - r_{ij}}{r_j^+ - r_j^-} \right)^2$$

其中,  $t_{ij} = t_{ij}^+ \times f_{ij}^-$  表示  $r_{ij}$  同时靠近  $r_j^+$  和远离  $r_j^-$  的程度,  $f_{ij} = f_{ij}^+ \times t_{ij}^-$  表示  $r_{ij}$  同时远离  $r_j^+$  和靠近  $r_j^-$  的程度。因此,  $r_{ij}$  相对于理想方案的综合 Vague 值矩阵可表示为:

$$A = ([t_{ij}, 1 - f_{ij}])_{n \times m}$$

结合各属性权重, 在综合 Vague 值矩阵  $A = ([t_{ij}, 1 - f_{ij}])_{n \times m}$  基础上, 可确定各备选方案相对理想方案的综合 Vague 值  $V_i = [t_i, 1 - f_i]$ :

$$t_i = \sum_{j=1}^m w_j \times t_{ij} = \sum_{j=1}^m w_j \times \left( \frac{r_{ij} - r_j^-}{r_j^+ - r_j^-} \right)^2 \quad (13)$$

$$f_i = \sum_{j=1}^m w_j \times f_{ij} = \sum_{j=1}^m w_j \times \left( \frac{r_j^+ - r_{ij}}{r_j^+ - r_j^-} \right)^2$$

备选方案  $i$  相对于理想方案的适应程度可通过如下评分函数计算得到:

$$\begin{aligned} S_1(X_i) &= t(x_i) - f(x_i) \\ S_2(X_i) &= 1 - f(x_i) \end{aligned} \quad (14)$$

评价备选方案优劣时首先判断各方案的  $S_1(X_i)$  评分函数值,  $S_1(X_i)$  越大表示方案  $i$  越优; 若  $S_1(X_i)$  相同, 再判断  $S_2(X_i)$  评分函数值,  $S_2(X_i)$  越大则方案越优。

### 3.5 实现步骤

基于以上论述, 在信息熵和 Vague 集基础上的两阶段多目标决策方法实现步骤为:

(1) 采用连接法对非劣最优解集进行初步筛选, 得到数量为  $N$  的备选方案集;

(2) 构建方案集的决策矩阵  $B = (b_{ij})_{n \times m}$  并进行归一化处理, 得到相对优属度矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times m}$ ;

(3) 计算各指标熵值, 采用式(7)确定客观权重向量  $w_{oj}' = (w_{o1}', w_{o2}', \dots, w_{om}')^T$ ;

(4) 结合主观权重向量  $w_s = (w_{s1}, w_{s2}, \dots, w_{s3})^T$ , 由式(9)计算综合权重向量  $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ ;

(5) 根据相对优属度矩阵  $R$  确定正、负理想方案优属度向量  $R^+$ 、 $R^-$ , 进而由式(12)计算方案集综合 Vague 值矩阵  $A = ([t_{ij}, 1 - f_{ij}])_{n \times m}$ ;

(6) 结合综合权重向量  $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ , 采用式(13)计算各备选方案相对理想方案的综合 Vague 值  $V_i = [t_i, 1 - f_i]$ ,  $i \in [1, n]$ ;

(7) 采用评分函数式(14)计算各备选方案的评分函数值  $S_1(X_i)$  和  $S_2(X_i)$ , 对评分函数值进行排序, 进而选出最优方案。

## 4 飞机环控/发动机系统多目标决策

根据得到的非劣最优解集分布, 分别选取起飞、加速爬升和高空超音速巡航阶段总熵产满意值为 25 860、20 380 和 27 900, 初选得到的 10 个备选方案如表 1 所示。

表 1 备选方案

方案	总熵产 $S_{Total}/(J \cdot kg^{-1})$		
	起飞	加速爬升	高空超音速巡航
1	25 799	20 365	27 779
2	25 800	20 363	27 891
3	25 798	20 375	27 774
4	25 816	20 372	27 555
5	25 818	20 365	27 546
6	25 801	20 366	27 739
7	25 846	20 358	27 782
8	25 795	20 375	27 822
9	25 802	20 363	27 722
10	25 805	20 375	27 688

由于希望各阶段总熵产越小越好, 因此按照成本型指标对备选方案集构成的决策矩阵进行归一化处理, 得到相对优属度矩阵  $R$ 。根据熵权法计算的客观权重向量为:

$$w_o' = (0.2947, 0.3803, 0.325)^T$$

根据所选取的 3 个飞行阶段在飞行剖面内代表的飞行时间长短给出主观权重  $w_s = (0.1, 0.4, 0.5)^T$ , 且 2 种权重的比重  $\alpha = 0.4$ ,  $\beta = 0.6$ , 由式(9)计算的综合权重为:

$$w = (0.1594, 0.4054, 0.4352)^T$$

计算相对优属度矩阵  $R$  中每个指标相对于理想方案的综合 Vague 值矩阵  $A$ :

$$A = ([t_{ij}, 1 - f_{ij}])_{10 \times 3} = \begin{bmatrix} [0.8493, 0.9938] & [0.346, 0.8304] & [0.1054, 0.5439] \\ [0.8135, 0.9904] & [0.4983, 0.9135] & [0, 0] \\ [0.8858, 0.9965] & [0, 0] & [0.115, 0.5633] \\ [0.346, 0.8304] & [0.0311, 0.3218] & [0.9485, 0.9993] \\ [0.3014, 0.7966] & [0.346, 0.8304] & [1, 1] \\ [0.7785, 0.9862] & [0.2803, 0.7785] & [0.1941, 0.687] \\ [0, 0] & [1, 1] & [0.0998, 0.5321] \\ [1, 1] & [0, 0] & [0.04, 0.36] \\ [0.7443, 0.9812] & [0.4983, 0.9135] & [0.24, 0.7398] \\ [0.6463, 0.9616] & [0, 0] & [0.3462, 0.8306] \end{bmatrix}$$

结合综合权重向量  $w$  计算各方案相对于理想方案的综合 Vague 值, 并采用评分函数对方案评分如表 2 所示。

表 2 评分结果

方案	Vague 值 $V_i$	评分
1	[0.3215, 0.7318]	(0.0533, 0.7318)
2	[0.3317, 0.5282]	(-0.1402, 0.5282)
3	[0.1912, 0.4040]	(-0.4048, 0.4040)
4	[0.4806, 0.6977]	(0.1783, 0.6977)
5	[0.6235, 0.8989]	(0.5224, 0.8989)
6	[0.3222, 0.7718]	(0.0940, 0.7718)
7	[0.4488, 0.6370]	(0.0858, 0.6370)
8	[0.1768, 0.3161]	(-0.5072, 0.3161)
9	[0.4251, 0.8487]	(0.2737, 0.8487)
10	[0.2537, 0.5147]	(-0.2316, 0.5147)

由表 2 中的评分值可以得到方案排序结果为: 方案 5 > 方案 9 > 方案 4 > 方案 6 > 方案 7 > 方案 1 > 方案 2 > 方案 10 > 方案 3 > 方案 8。最优方案为方案 5, 其参数配置情况如表 3 所示。

表 3 参数配置情况

参数项	取值	参数项	取值
初级热交换器效率	0.846	次级热交换器效率	0.816
压气机压力比	1.857	涡轮压力比	2.044
热交换器流比	1.15	风扇压力比	3
高压压气机压力比	3	涵道比	0.2
涡轮入口温度(起飞)/K	1600	涡轮入口温度(爬升)/K	1600
涡轮入口温度(巡航)/K	1608	引气比例(起飞)	0.001
引气比例(爬升)	0.001	引气比例(巡航)	0.001

## 5 结束语

本文提出一种两阶段多目标决策方法用于飞机环控系统和发动机系统多目标决策分析。在非劣最优解集基础上首先进行方案初选, 然后采用改进综合权重的 Vague 集决策方法对选中方案进行模糊评价和排序, 从而找到最满意的参数配置。熵权法能够充分发掘方案集包含的信息, 结合主观权重的改进综合权重方法能够较客观地反映不同指标在决策过程的重要程度。对环控系统和发动机系统进行多目标决策分析验证了该方法的有效性。

(下转第 262 页)