

液体火箭发动机离心泵叶轮 的多目标优化设计

¹郑贇韬, ¹蔡国飙, ²尹贵增

(¹北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083; ²中国航天时代电子公司二三零厂, 北京 100854)

摘 要: 根据液体火箭发动机系统设计确定的离心泵的性能参数, 对泵叶轮的几何参数分别进行了单目标和多目标优化设计。优化目标包括: 泵的扬程、效率和轴功率。在多目标优化设计当中, 采用超传递近似法对目标之间的重要性进行模糊评价, 确定各目标的权值, 从而求出优化结果。比较结果表明, 多目标优化比单目标优化所得结果更符合工程要求, 而对目标的重要性进行评价, 所得优化结果更符合设计者的偏好。

关键词: 多目标优化; 离心泵; 超传递近似

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2006)01-0014-05

Multi-objective optimization and design for centrifugal impeller of rocket engine pumps

¹Zheng Yuntao, ¹Cai Guobiao, ²Yin Guizeng

(¹ School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China

² No.230 Factory of China Aerospace Times Electronics Corporation, Beijing 100854, China)

Abstract: The structural candidates of centrifugal impeller were designed respectively from single-objective and multi-objective optimization based on the system design of liquid propellant rocket engine. The super-transitive approximate method was presented in confirming the weight of objectives that include pump discharge pressure, rotor efficiency and required input power in multi-objective optimization. Comparing on results of single-objective and multi-objective optimization, the latter is better accordant with feasible project. In estimating the importance of objectives of multi-objective optimization, more satisfying results can be get.

Key words: multi-objective optimization; centrifugal pump; super-transitive approximate

收稿日期: 2005-11-25; 修回日期: 2005-12-26。

作者简介: 郑贇韬 (1979—), 女, 博士生, 研究领域为液体火箭发动机系统和部件的多学科优化设计。

1 引言

涡轮泵是液体火箭发动机的主要部件，在泵压式的推进剂供应系统中，发动机系统所需的压力主要由泵来提供。随着液体火箭发动机推力、比冲和燃烧室压力的不断提高，涡轮泵在液体火箭发动机中的地位也越来越重要。而单级离心泵在液体火箭发动机中的使用率最高。叶轮是离心泵的核心部件，因此叶轮的结构直接影响泵整体的性能。本文以泵的扬程、效率和轴功率为优化目标，对某液体火箭发动机离心泵叶轮的主要结构参数进行优化设计。在多目标优化中，将运筹学理论引入其中，采用超传递近似法^[1]对目标之间的相对重要性进行模糊评价，确定各目标的权值，使得各目标的权重分配更为合理，再由线性加权法计算不同的权值对应的优化结果，并对结果进行分析。

2 超传递近似法

对于多目标问题，决策者并不是一开始就十分清楚每个目标应加多大的权系数，需要一种方法来支持决策者合理和较精确的确定相应的权系数。在对目标之间的重要性进行模糊评价以及对方案进行模糊排序时，satty 提出的特征向量法^[1]的概念被认为是一种很好的工具，但存在的问题是在进行二元判断时可能会出现不一致性。为此，narasimhan 提出用一种简单的几何平均法构建二元比较矩阵的超传递近似法^[2]。

2.1 生成二元比较矩阵

通常决策者直接设定第 k 个目标前的具体权值 I_k 是困难的，但让其估计第 k 个目标是第 1 个目标几倍重要时却是比较容易的。决策者每次对两个目标进行重要性比较，共需作 $N(N-1)/2$ （设有 N 个目标）次比较，第 i 个分目标对第 j 个分目标的相对重要性估计为 a_{ij} ，当 f_i 比 f_j 重要时， a_{ij} 大于 1；当 f_i 与 f_j 同等重要时， a_{ij} 等于 1；当 f_j 比 f_i 重要时， a_{ij} 小于 1。由此形成了二元比较矩阵 A ，其中 $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 。

2.2 求超传递矩阵

构造互补矩阵 B^1, B^2, \dots, B^N ，且互补矩阵 B^i 的第 i 行等于矩阵 A 的第 i 行，即 $b_i^i = a_i$ ；

$$B^i = (b_1^i, b_2^i, \dots, b_N^i)^T$$

式中 $b_i^i = a_i$ ， $b_1^i = (a_{i1})^{-1}b_i^i$ ， $b_2^i = (a_{i2})^{-1}b_i^i$ ， $b_N^i = (a_{iN})^{-1}b_i^i$ ；

构造超传递近似矩阵 $A^* = (a_{ij}^*)_{N \times N}$ 其中，

$$a_{ij}^* = (b_{ij}^1 \times b_{ij}^2 \times \dots \times b_{ij}^N)^{\frac{1}{N}}$$

2.3 特征向量法求权系数

$$\begin{cases} (A^* - a_{\max} I)I = 0 \\ \sum_{i=1}^N I_i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

I 是求 A^* 最大特征值 a_{\max} 对应的特征向量，其分量 $I_i (i=1, \dots, N)$ 即为对应的目标函数的权系数。

3 离心泵性能计算

根据泵叶轮的几何参数以及泵的流量 Q 、转速 n 、泵内液体密度 ρ 计算泵的压头 H 、效率 η 和泵的轴功率 N_p 。图 1 为叶轮的主要几何参数。 D_1 是叶片进口直径， D_2 是叶轮出口直径， b_1 是叶片进口宽， b_2 是叶轮出口宽， β_1 是叶片进口角， β_2 是叶片出口角， z 是叶片数， s 是叶片的厚度。

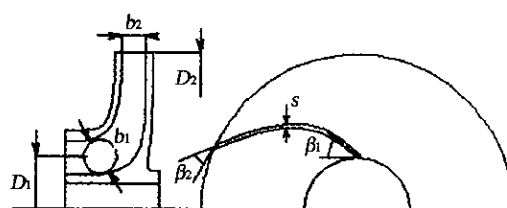


图 1 离心泵叶轮主要设计参数

Fig.1 Design parameters of the centrifugal impeller

叶片进口处速度的轴向分量 C_{m1} 为：

$$C_{m1} = \frac{Q}{h_v \cdot \rho D_1 b_1 j} \quad (2)$$

式中： h_v ——泵的容积效率；

j ——叶片对液流的排挤系数^[3]；

$$j = 1 - \frac{sz}{pD_1 \sin b_1} \quad (3)$$

叶片进口圆周速度 u_1 为:

$$u_1 = \frac{pD_1 n}{60} \quad (4)$$

根据速度三角形, 叶片进口处速度的圆周向分量 C_{u1} 为:

$$C_{u1} = u_1 - \frac{C_{m1}}{\tan b_1} \quad (5)$$

叶片出口速度周向分量 C_{u2} 和叶片出口圆周速度 u_2 的计算与叶片进口处类似。

泵的扬程 H 为:

$$H = \frac{1}{1+z_p} \cdot \frac{u_2 C_{u2} - u_1 C_{u1}}{g} \quad (6)$$

式中, g 为重力加速度; z_p 为有限叶片的修正系数^[4]。

$$z_p = \frac{2 \cdot (0.65 + 0.6 \cdot \sin b_2)}{z(1 - (\frac{D_1}{D_2})^2)} \quad (7)$$

泵的比转速 n_s 为:

$$n_s = \frac{3.65 \cdot n \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} \quad (8)$$

泵的效率 h 为:

$$h = h_h h_v h_m \quad (9)$$

式中, h_h 为泵的水力效率; h_m 为泵的机械效率。

$$h_h = 1 + 0.835 \cdot \lg \sqrt[3]{\frac{Q}{n}} \quad (10)$$

$$h_v = \frac{1}{1 + 0.68 \cdot n_s^{-(\frac{2}{3})}} \quad (11)$$

$$h_m = 1 - 0.07 \cdot (\frac{n_s}{100})^{-\frac{7}{6}} \quad (12)$$

泵的轴功率 N_p 为:

$$N_p = \frac{rgQH}{h} \quad (13)$$

4 离心泵叶轮优化设计

4.1 优化模型

已知某液体火箭发动机燃料泵的转速为 35000r/min, 质量流率为 22kg/s; 在 iSIGHT 优化平台上, 对泵叶轮分别进行单目标和多目标优化设计^[7]。

设计变量: 叶轮的几何参数 (D_1 , D_2 , b_1 , b_2 , b_1 , b_2 , z , s);

优化目标: 最大化泵的扬程和效率, 最小化泵的轴功率; 用评价函数法表示为:

$$\max \sum_{i=1}^3 \mathbf{x}_i \left(\frac{f_i^0 - f_i}{f_i^0} \right) \quad (14)$$

式中, f_1, f_2 分别为扬程和效率的值, f_3 为轴功率值的倒数; f_i^0 期望值, \mathbf{x}_i 为分目标的权系数。在评价函数中对各分目标进行归一化处理, 消除了不同数量级对结果的影响。

约束条件: 表 1 为离心泵叶轮设计变量的取值范围。

表 1 离心泵设计的变量取值范围

Tab.1 Design variables ranges of the centrifugal pump design problem

设计变量	D_1 mm	D_2 mm	b_1 mm	b_2 mm	b_1 deg	b_2 deg	s mm	z
下限	200.0	200.0	10.0	10.0	15	15	1	5
上限	500.0	500.0	65.0	65.0	50	40	5	18

4.2 超传递近似法求出最佳权分配

根据工程部门的设计经验认为扬程的重要性是效率的 2 倍、轴功率的 4 倍，效率的重要性是轴功率的 3 倍。

确定扬程、效率、轴功率之间的二元比较矩阵为：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 1/2 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

转化为超传递矩阵为

$$A^* = \begin{bmatrix} 1 & 1.747154 & 4.578850 \\ 0.5723594 & 1 & 2.620748 \\ 0.2183955 & 0.3815705 & 1 \end{bmatrix}$$

矩阵 A^* 最大特征值为 3，根据方程 (1) 求出其对应的特征向量是：

$$I = [0.558 \quad 0.320 \quad 0.122]^T$$

即为扬程、效率、轴功率对应的权系数。

4.3 基于 iSIGHT 的优化策略

对叶轮几何参数的优化在 iSIGHT 下完成，采用如下优化策略：

首先利用遗传算法 (Genetic Algorithm) 的全局搜索性对优化问题进行全局寻优。在全局寻优到的最优解的可能存在域，利用序列二次规划 (Sequential Quadratic Programming) 方法进行局部寻优，确定最优解。通过组合优化的方案，确保在设计变量的可行域中找到全局最优点。基于仿真程

序和 iSIGHT 的对叶轮的优化流程如图 2 所示。

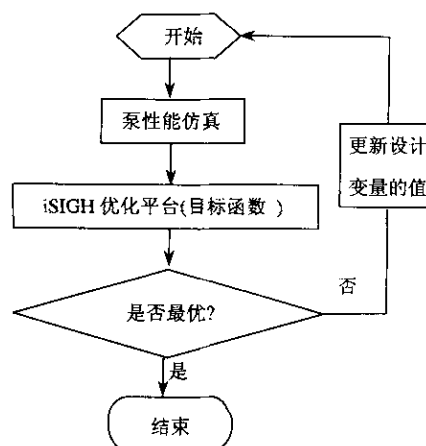


图 2 优化过程流程图

Fig.2 Flow chart of optimization

4.4 优化结果分析

分别对泵的扬程、效率和轴功率进行单目标优化，再按照权系数分别是 (1,1,1) 和 (0.558, 0.320, 0.122) 对泵叶轮进行多目标优化，所得优化结果如下：

表 2 为不同的优化过程对应的设计变量的值。

4.5 优化结果分析

分别对泵的扬程、效率和轴功率进行单目标优化，再按照权系数分别是 (1,1,1) 和 (0.558,0.320,0.122) 对泵叶轮进行多目标优化，所得优化结果如下：

表 2 为不同的优化过程对应的设计变量的值。

表 2 离心泵叶轮的单目标和多目标优化设计

Tab.2 Single-objective and multi-objective optimization design of centrifugal impeller

设计变量		D_1 mm	D_2 mm	b_1 mm	b_2 mm	b_1 deg	b_2 deg	s mm	z
单目标	扬程最大	233.25	459.3997	53.44833	21.83974	28	19	4.479816	11
	效率最大	226.9942	326.9943	55.7679	10.48611	40	16	4.649749	6
	输入功率最小	248.1579	349.4684	47.19073	11.13529	46	34	1.574755	5
多目标	(1,1,1)	218.2626	324.6873	40.41768	11.02755	37	16	4.914825	14
	(0.558,0.320,0.122)	342.7067	443.0595	32.98307	11.9074	43	16	4.725362	9

表 3 是不同优化过程对应的三个优化目标的值，(a) 为扬程值、(b) 为效率的值、(c) 为轴功

率的值。

由表 2 和图 3 可以看出，对于不同的优化过

程, 所得优化结果截然不同。在单目标优化中, 最大化泵压头的设计对应的泵的效率值偏小, 而泵的轴功率值偏大; 同样在最大化泵的效率 and 最小化泵的轴功率的设计对应的泵的压头偏小。

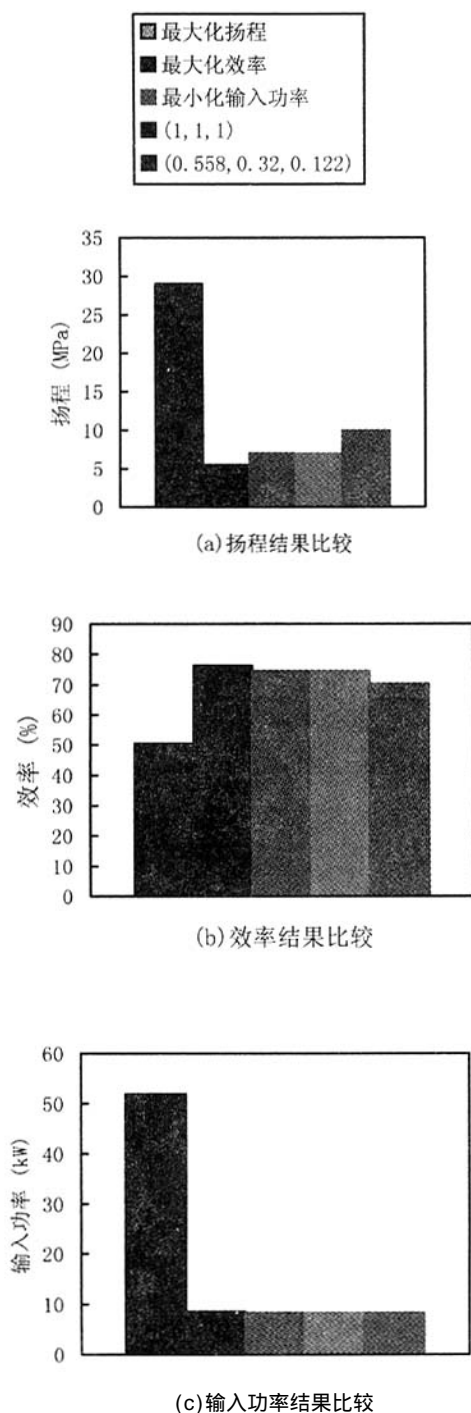


图 3 单目标和多目标优化结果

Fig.3 Results of single and multi objective optimization

因此泵的压头和泵的效率, 泵的压头和泵的轴功率是相互冲突的优化目标。对泵叶轮进行单目标的优化设计不能满足实际设计要求。

在多目标优化中, 不同的权系数分配也将产生不同的优化结果。如果忽略目标的不同重要程度, 将权系数均设为 1, 则优化结果不能合理的反映目标的重要性, 特别是对于有冲突的优化目标, 将目标视为同等重要不能直观反映设计者的偏好。根据目标的重要程度对多个目标进行两两比较, 由超传递近似法求出二元比较矩阵的近似矩阵, 再通过特征向量法计算目标的权系数, 能够更合理的反应设计者的偏好。

5 结束语

将运筹学中的特征向量法求解目标的权值引入泵叶轮的多目标优化当中, 并用超传递近似法改进特征向量法中的不一致性。由图中的结果可以看出对于复杂结构的多目标优化问题, 考虑目标之间的相对重要程度会直接影响优化结果, 使设计值更趋近于设计者偏好的值。比等权重的多目标优化更具针对性。

参考文献:

- [1] 徐光辉. 运筹学基础手册[M]. 科学出版社, 1999.
- [2] 徐玖平, 李军编著. 多目标决策的理论与方法[M]. 清华大学出版社, 2005, 3.
- [3] 张远君主编. 液体火箭发动机涡轮泵设计[M]. 北京航空航天大学出版社, 1995.
- [4] 离心泵设计基础编写组. 离心泵设计基础[M]. 机械工业出版社, 1974.
- [5] 丁成伟主编. 离心泵与轴流泵原理及水力设计[M]. 机械工业出版社, 1981.
- [6] Akira Oyama, Meng-sing liou, Multiobjective Optimization of Rocket Engine Pumps Using Evolutionary Algorithm[R]. AIAA 2001-2581.
- [7] Sobieski J S, Haftka R T. Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent development[R]. AIAA96-0711.

(编辑: 王建喜)