

文章编号: 1000-8055(2007)09-1554-06

用于概念设计的离心泵叶轮多目标优化

郑贇韬¹, 蔡国飙¹, 尘 军²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083; 2. 北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 用两种多目标优化方法对某型液体火箭发动机氧化剂泵叶轮进行多目标优化设计. 在优化过程中, 以泵的扬程、效率和泵质量为优化目标, 对叶轮的主要几何参数进行优化. 用 NCGA (Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm) 方法得到优化问题的 Pareto 前沿; 用超传递近似法得到分目标的最佳权值, 进而采用评价函数法求出优化问题的最佳设计值. 并分析了主要结构参数对泵性能参数的影响.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 火箭发动机; 离心泵; 叶轮; 优化; Pareto 前沿

中图分类号: V434

文献标识码: A

Multi-objective optimization of centrifugal pump impeller for conceptual design

ZHENG Yun-tao¹, CAI Guo-biao¹, CHEN Jun²

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

2. China Aerospace Science and Technology Corporation Eleventh Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: Two multi-objective optimization methods were applied to design the centrifugal oxidizer pump impeller for liquid propellant rocket engine. Major geometric parameters of pump impeller were optimized for the targeted delivery head, efficiency and mass of pump. The Pareto Front of multi-objective optimization was gained by Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm (NCGA); the super-transitive approximation method was introduced to acquire optimal weights of individual objectives. Then, Evaluation Function method was used to obtain optimal design of multi-objective optimization. The effects of major structural parameters on pump performance parameters were also analyzed.

Key words: aerospace propulsion system; rocket engine; centrifugal pump; impeller; optimization; pareto front

涡轮泵是液体火箭发动机的主要部件, 在泵压式推进剂供应系统中, 发动机系统所需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, 叶轮的结构直接影响泵整体性能. 本文以泵的扬程、效率、质量为目标, 对某型液体火箭发动机单级液氧泵叶轮的主要结构参数进行初步的设计优化. 运用两种多目标优化方法, 用 NCGA^[1] (Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm) 方法求出优化问题的 pareto 前沿, 即非劣

收稿日期: 2006-08-08; 修订日期: 2006-11-20

基金项目: 民用航天预研项目

作者简介: 郑贇韬(1979-), 女, 湖北襄樊人, 博士生, 研究领域为液体火箭发动机多学科设计优化, E-mail: ehuamei@sina.com

解集,分析各目标之间的关系;用超传递近似法^[2]对目标之间的相对重要性进行模糊评价,确定各目标的最佳权分配,用评价函数法计算最佳权系数对应的最优解,并对结果进行分析。

1 方法简述

1.1 NCGA 法

NCGA 方法是由最早的 GA (Genetic Algorithm) 算法发展而来,处理多目标问题的遗传算法,它视各目标同等重要,并能获得优化问题的 pareto 前沿。

NCGA 方法的步骤是

- ①初始化:令 $t = 0$, 设置第一代个体 P_0 , 种群数为 N , 计算个体对应的适应值函数, 计入 A_0 ;
- ②令 $t = t + 1, P_t = A_{t-1}$;
- ③排序:个体 P_t 按向聚集的目标值的方向进行排序;
- ④分组:个体 P_t 根据上述排序分为若干组, 每组由两个个体组成;
- ⑤交叉和变异:在每一组中执行交叉和变异操作, 由两个父代个体产生两个子代个体, 同时父代个体被删除;
- ⑥重组:所有子代个体组成一组新的 P_t ;
- ⑦更新:将 A_{t-1} 与 P_t 组合, 按环境选择 (Environment Selection) 机制, 从 $2N$ 个个体中, 选出其中的 N 个个体;
- ⑧终止:如果满足终止条件, 则终止仿真程序, 否则返回至第 ②步。

NCGA 通过排序后分组进行交叉的方法实现“相邻繁殖”的机制, 从而使接近于 Pareto 前沿的解进行交叉繁殖的概率增大, 加速计算收敛过

程, 从而减少了仿真计算的时间。对叶轮的优化过程如图 1 所示。

1.2 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分目标对应权系数的值, 通常根据经验选取一组权系数。不同决策者对同一多目标优化问题的偏好不同, 需要一种方法支持决策者合理和较精确的确定分目标相应的权系数。超传递近似法就是一种对目标之间的重要性进行模糊评价的简单有效的方法。

关于确定权系数已经有若干方法, 如特征向量法、最小平方和法和最大熵法等。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, 特征向量法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。

超传递近似法属于运筹学理论, 在目标之间首先两两比较生成二元比较矩阵, 进而求得超传递近似矩阵, 最后用特征向量法求出该矩阵最大特征值对应的特征向量, 即为分目标对应的权系数。具体步骤为

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

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

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

③特征向量法求权系数

$$\begin{cases} (A^* - \alpha_{\max} I) \lambda = 0 \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{cases}$$

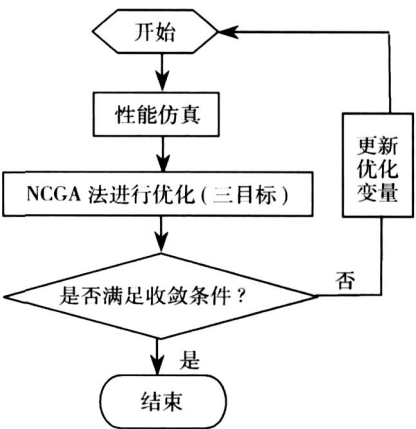


图 1 优化流程图

Fig. 1 Flow chart of optimization

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

1.3 评价函数法

评价函数法是一种处理多目标问题简单有效的方法. 通过多种数学模型均可将多个目标转化为一个数值目标的评价函数, 从而将多目标优化问题转换为单目标优化问题. 常用的评价函数法包括线性加权法、 p 模理想点法、最短距离法、极大模理想点法等. 本文在用超传递近似法求出各分目标的最佳权分配后, 采用线性加权法求解多目标问题的最优解. 线性加权法的评价函数为

$$u(F) = \sum_{i=1}^m \omega_i f_i$$

式中 ω 为权系数, f_i 为分目标值.

对叶轮几何参数的优化在 iSIGHT 软件框架下完成, 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与图 1 类似. 在图 1 的仿真模块之前, 加入超传递近似法对多个目标进行重要性评估, 计算分目标的权系数.

2 离心泵叶轮的多目标优化

2.1 仿真模型

根据泵叶轮几何参数以及泵的流量 Q 、转速 n 、泵内液体密度 ρ 计算泵的扬程 H 、效率 η ^[3]. 图 2 显示叶轮的主要几何参数. D_1 为叶片进口直径, D_2 为叶轮出口直径, b_1 为叶片进口宽, b_2 为叶轮出口宽, β_1 为叶片进口角, β_2 为叶片出口角, z 为叶片数, s 为叶片的厚度.

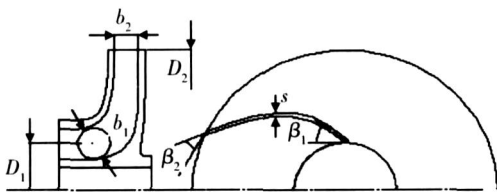


图 2 叶轮结构简图和主要设计参数

Fig. 2 Design parameters of the centrifugal impeller

泵的扬程 H 为

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

式中 C_{u2} ——叶片出口速度周向分量;

u_2 ——叶片出口圆周速度;

g ——重力加速度;

z_p ——有限叶片的修正系数^[4].

$$C_{u2} = u_2 - \frac{C_{m2}}{\tan \beta_2} \quad (2)$$

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60} \quad (3)$$

$$z_p = \frac{2 \cdot (0.65 + 0.6 \cdot \sin \beta)}{z \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^z \right]} \quad (4)$$

(2) 式中 C_{m2} 为叶片出口处速度的轴向分量:

$$C_{m2} = \frac{Q}{\eta_v \cdot \pi D_1 b_1 \phi} \quad (5)$$

式中 ϕ ——叶片对液流的排挤系数^[4].

$$\phi = 1 - \frac{sz}{\pi D_1 \sin \beta} \quad (6)$$

叶片进口速度周向分量 C_{u1} 和叶片进口圆周速度 u_1 的计算与叶片出口处类似.

泵的效率 η 为

$$\eta = \eta_h \eta_m \eta_v \quad (7)$$

式中 η_h ——泵的水力效率;

η_m ——泵的机械效率;

η_v ——泵的容积效率.

$$\eta_h = 1 + 0.835 \cdot \lg \sqrt[3]{\frac{Q}{n}} \quad (8)$$

$$\eta_v = \frac{1}{1 + 0.68 \cdot n_s^{-(2/3)}} \quad (9)$$

$$\eta_m = 1 - 0.07 \cdot \left(\frac{n_s}{100} \right)^{-\frac{2}{6}} \quad (10)$$

泵的比转速 n_s ^[4] 为

$$n_s = \frac{3.65 \cdot n \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} \quad (11)$$

泵的轴功率 N_p 为

$$N_p = \frac{\rho g Q H}{\eta} \quad (12)$$

泵的质量模型:

通过收集国内外几个同类型发动机的相关数据, 参照文献[5]确定影响发动机各主要部件质量的系统参数, 建立泵的质量模型, 并根据已知数据进行数值拟合, 确立质量模型的计算公式.

$$M = a \cdot Q^b \cdot n^c \cdot H^d \quad (13)$$

式中 M ——泵的质量;

a, b, c, d ——拟合系数.

拟合所得泵质量模型计算公式仅适用于同类结构和推进剂的液体火箭发动机^[6]。

2.2 优化模型

已知氧化剂泵的转速为 18 000 (r/min),质量流率为 138 (kg/s),以叶轮的几何参数作为设计变量,以泵的扬程和效率以及泵的质量为优化目标,对泵叶轮进行了初步的优化设计。

设计变量(8 个):叶片进口直径 D_1 、叶轮出口直径 D_2 、叶片进口宽 b_1 、叶轮出口宽 b_2 、叶片进

口角 β_1 、叶片出口角 β_2 、叶片数 z 、叶片的厚度 s ;

优化目标(3 个):最大化泵的扬程、最大化泵的效率、最小化泵的质量;

约束条件(12 个):包括 8 个变量约束,3 个目标约束,和泵的最大输入功率约束。

表 1 为离心泵叶轮设计变量的取值范围,泵的输入功率约束条件表示为

$$P \leq P_0 \tag{14}$$

式中 P_0 为发动机涡轮的输出功率。

表 1 离心泵叶轮设计变量的分布范围
Table 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	β_1 / (°)	β_2 / (°)	s / mm	z
变量下限	80.0	90.0	10.0	10.0	15	15	2	5
变量上限	200.0	400.0	40.0	30.0	50	40	5	18

由于设计变量数量较多,为提高计算效率,采取下列措施

- 1) 叶片进口角与叶片出口角的变量类型设定为整型变量;
- 2) 各设计变量进行归一化处理,消除不同数量级对优化结果的影响。

2.3 NCGA 法计算优化问题的 Pareto 前沿

在泵叶片的优化设计过程中,定义 NCGA 的种群数为 100,代数为 200,交叉概率为 0.1,变异概率为 0.01,图 3 显示 NCGA 方法求出的 Pareto 前沿。

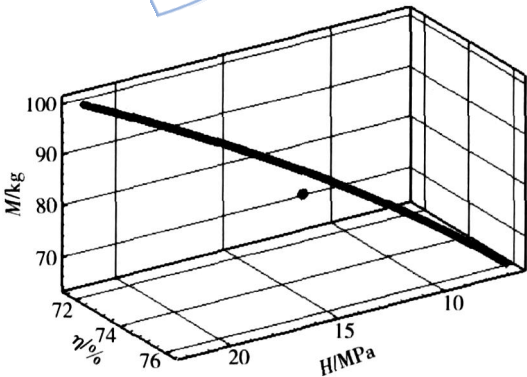


图 3 NCGA 方法得到的 Pareto 前沿
Fig. 3 Pareto front from NCGA method

图中的点为初始设计点,非凹曲线即为所求三个目标优化的 Pareto 前沿。

图 4 和图 5 分别显示二维平面上目标函数的值,图 4 表示泵效率与扬程的关系,图 5 表示泵质

量与扬程的关系。

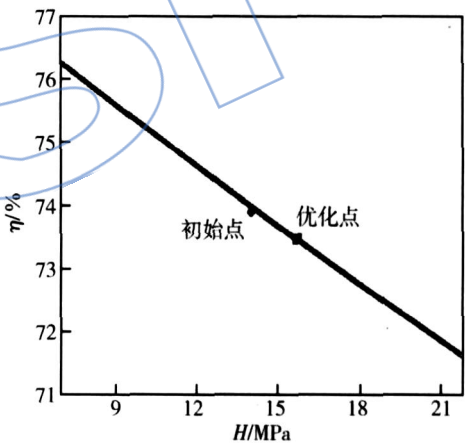


图 4 扬程和效率的目标值

Fig. 4 Objective function values of head and efficiency

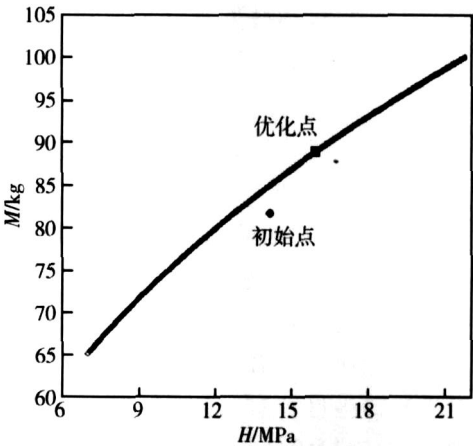


图 5 扬程和质量的目标值

Fig. 5 Objective function values of head and weight

根据 2.1 节公式,可以将扬程、效率、泵质量之间的关系用下式表示

$$\begin{cases} \eta = \eta_h \frac{1 - y_2 H^{\frac{2}{3}}}{1 + y_1 H^{\frac{2}{3}}} \\ M = y_3 H^{0.3778} \end{cases} \quad (15)$$

式中

$$y_1 = 0.287 n^{-\frac{2}{3}} Q^{-\frac{4}{3}}$$
$$y_2 = 3.329 n^{-\frac{2}{6}} Q^{-\frac{2}{12}}$$

y_1, y_2, y_3 是关于泵转速 n 和泵流量 Q 的函数, y_3 的解析式见式(13).

由(15)式可以看出,效率和质量都是泵扬程的幂函数.如图 4 所示,随着泵的扬程增高,泵的泄漏量也就越大,从而泵的效率逐渐减小.如图 5 所示,随着泵的扬程增高,推力室的压力增大,必然带来涡轮泵的尺寸增大、质量增加.

2.4 超传递近似法确定最佳权分配

根据工程部门的设计经验,假设效率的重要性是扬程的 3 倍、泵质量的 2 倍,泵质量的重要性是扬程的 2 倍.设计者可以根据具体情况,设置分目标的重要性,建立不同的二元比较矩阵,求出相应的权值.

确定扬程、效率、泵质量之间的二元比较矩阵为

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

转化为超传递矩阵为

$$A^* = \begin{bmatrix} 1 & 0.30285 & 0.55032 \\ 3.3019 & 1 & 1.81713 \\ 1.8171 & 0.55032 & 1 \end{bmatrix}$$

矩阵 A^* 最大特征值为 3,求出其对应的特征向量是

$$\lambda = [0.163 \quad 0.54 \quad 0.297]^T$$

即为扬程、效率、泵质量对应的权系数.

采用 C# 语言编制界面,调用 Fortran 计算程序求三个目标的最佳权重系数.图 6 为可视界面.界面上半部分为输入条件,第一行给出泵效率对于泵扬程的重要程度倍数,第二行输入泵效率相对于泵质量的重要程度倍数,第三行输入泵质量相对于泵扬程的重要程度倍数.输入参数可以是大于零的任意实数.下半部分为输出结果.分别输出扬程、效率和质量的权系数.

对泵的扬程、效率和泵质量进行单目标优化,再按照权系数(0.163,0.54,0.297)对泵叶轮进行多目标优化,所得优化结果如表 2 所示.

表 2 单目标和多目标优化设计值

Table 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	$\beta_1/(\circ)$	$\beta_2/(\circ)$	s/mm	z
单 目 标	扬程最高	137.36	220.96	22.19	15.82	44	39	2.6	8
	效率最高	140.27	176.19	21.50	18.17	44	36	4.5	10
	质量最小	131.21	181.2	39.4	16	18	17	3.1	7
	综合设计	160.96	236.56	30.48	13.22	32	23	3.92	5

单目标的最优值分别为:扬程(21.77 MPa)、效率(76.27%)、质量(65.1 kg),但这三个目标不能同时达到最优.由图 4 和图 5 可以看出,叶轮的初始设计点靠近优化问题的 Pareto 前沿,并且处于 Pareto 前沿的中部,因此它是一种折衷的设计方法.而根据超传递矩阵法确定的权值对应的最优解靠近 Pareto 前沿的一端,体现了设计者对三个目标重要性的偏好.

根据优化所得的泵叶轮结构参数,对叶轮的主轮盘进行静强度计算.假设轮盘处于平面应力状态,叶片以附加质量的形式计入轮盘应力计算.采用一次算法求出轮盘的应力.由第四强度理论,平面应力状态下的当量应力为^[7]

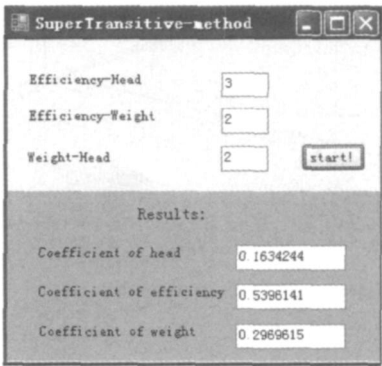


图 6 权重系数计算界面

Fig. 6 Interface of coefficient calculation

$$\sigma_{eq4} = \sqrt{\tau^2 + \sigma^2 - \tau\sigma}$$

求出轮盘的最大当量应力 129.31 MPa, 小于材料的许用应力, 根据比较应力法, 设计的叶轮结构是安全可靠的。

2.5 优化结果分析

根据超传递近似法求出最佳权分配对应的最优解与初始设计点相比扬程提高了 13.9%, 质量增加了 5.0%, 效率下降了 0.8%。即在效率基本不变的情况下, 增大了泵的扬程同时以增加泵质量为代价。可知扬程和质量是相互冲突的一对性能指标。不同的设计者, 根据超传递近似法可求出符合自己偏好的权重分配, 进而获得最优解。

分析表 2, 当追求目标为效率最大时, 叶轮的出口直径 D_2 达到最小。这是由于叶轮的外径越小, 则由此产生的圆盘摩擦损失越小, 从而提高叶轮的效率。

当追求目标为扬程最大时, 叶轮的出口直径 D_2 和叶片的出口角 β 均较大。这是由于采用大的 β , 可提高扬程系数。

叶轮出口直径 D_2 是影响泵性能的重要参数。若仅考虑提高泵的效率而追求叶轮的出口直径最小, 必然导致泵扬程的降低。因此需综合考虑扬程和效率的重要性以选择叶轮的出口直径。

对于叶片数的选择, 根据有限叶片理论, 当叶片数减小, 叶片间的流道增大, 由于叶轮间轴向旋涡的影响, 叶轮出口处的滑移增大, 随着流量的增加, 扬程急剧下降, 可减小或消除扬程驼峰曲线。同时减少叶片数可减少叶片对液流入口的排挤, 降低叶轮入口动压降, 从而提高泵叶轮的抗汽蚀性能。

总体来看, 叶轮出口参数对泵性能影响更为显著。

3 结 论

本文综合权衡泵扬程、效率、泵质量的重要程度对液体火箭发动机离心泵叶轮进行多目标设计优化。

用多目标遗传算法(NCGA)求出优化问题的非劣解集。

结合超传递近似法与评价函数法求出优化问题的最优解。

用 C# 语言将求解最佳权系数的过程通过可视化界面显示, 便于工程部门的使用。

参考文献:

- [1] Watanabe S, Hiroyasu S, Miki M. Neighborhood cultivation genetic algorithm for multi-objective optimization problems [C] // Proceeding of the 4th Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution And Learning. Singapore: 2002, 198-202.
- [2] 徐玖平, 李军编著. 多目标决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] Oyama A, Liou Mengsing. Multiobjective optimization of rocket engine pumps using evolutionary algorithm [R]. AIAA 2001-2581, 2001.
- [4] 离心泵设计基础编写组. 离心泵设计基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1974.
- [5] 朱森元. 氢氧火箭发动机及其低温技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 15-17.
- [6] 郑赞韬, 童晓艳, 蔡国飙, 等. 液体火箭发动机系统设计仿真与优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(7): 860-864. ZHENG Yuntao, TONG Xiaoyan, CAI Guobiao, et al. Simulation and optimization of liquid propellant rocket engines [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(7): 860-864.
- [7] 张远君主编. 液体火箭发动机涡轮泵设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.