

燃油离心泵多目标优化设计及仿真分析^{*}

李 嘉¹, 李华聪², 王万成³, 王 玥³

(1. 长安大学 工程机械学院, 陕西 西安 710064;

2. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072;

3. 中国航发西安动力控制科技有限公司, 陕西 西安 710077)

摘 要: 针对燃油离心泵高效、高抗汽蚀的优化设计问题, 进行了基于损失模型和SQP (Sequential Quadratic Programming) 算法的多目标优化设计及仿真研究。建立表征叶轮和蜗壳等水力、容积和机械各效率的综合损失模型, 并利用必需汽蚀余量来表征汽蚀特性。利用SQP算法构造合理的适应度函数, 建立离心泵多目标优化数学模型。对燃油离心泵进行优化设计并与其它优化算法进行了对比, 各优化算法的优化结果相似, 但SQP算法优化求解的迭代步数相对较少。基于CFD技术进行仿真及外特性预测, 验证燃油离心泵多目标优化设计方法的有效性。结果表明: 相比传统方法, 基于损失模型和SQP算法优化的离心泵流动损失更低, 其进口流动更利于抗汽蚀性能; 同时, 优化的离心泵高效工作区域相对宽广, 必需汽蚀余量相对较低, 抗汽蚀性能有所改善。

关键词: 航空发动机; 燃油离心泵; 多目标优化; 综合损失模型; 高效; 汽蚀

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2021) 03-0666-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200247

Multi-Objective Optimization Design and Simulation for Fuel Centrifugal Pump

LI Jia¹, LI Hua-cong², WANG Wan-cheng³, WANG Yue³

(1. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. China AVIC Xi'an Aero-Engine Controls Technology Co. Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Aiming at the optimization design for a fuel centrifugal pump with high efficiency and high anti-cavitation performance, a multi-objective optimization design based on loss-model and SQP (Sequential Quadratic Programming) was proposed and simulated. A combined loss-model was established which characterized the pump hydraulic, volumetric, and mechanical efficiencies. Meanwhile, the cavitation function was established and characterized by the required net positive suction head. Then, a reasonable fitness function was constructed by SQP and the related mathematical model for multi-objective optimization was completed. According to the simulations of different optimization algorithms, the results of selected algorithms are almost similar but the SQP uses the fewest iterative steps. Finally, the pump external performance was predicted by CFD to verify the effectiveness of proposed multi-objective optimization design method. Compared to that of traditional pump, the

^{*} 收稿日期: 2020-04-20; 修订日期: 2020-05-11。

基金项目: 陕西省自然科学基金青年项目 (2020JQ-335); 中央高校青年项目 (300102259101); 国家科技重大专项 (2017-V-0013-0065)。

通讯作者: 李 嘉, 博士, 讲师, 研究领域为燃油泵性能与可靠性一体设计技术。E-mail: lijia@chd.edu.cn

引用格式: 李 嘉, 李华聪, 王万成, 等. 燃油离心泵多目标优化设计及仿真分析[J]. 推进技术, 2021, 42(3):666-674.
(LI Jia, LI Hua-cong, WANG Wan-cheng, et al. Multi-Objective Optimization Design and Simulation for Fuel Centrifugal Pump[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(3):666-674.)

flow-loss of optimized pump is lower and inlet flow condition is more beneficial to anti-cavitation. Additionally, its high-efficiency zone is wider and the required net positive suction head is lower. Therefore, the pump efficiency and anti-cavitation performance are both regulated and improved.

Key words: Aero engine; Fuel centrifugal pump; Multi-objective optimization; Combined loss-model; High efficiency; Cavitation

1 引言

随着军事科学、航空航天科学等的高速发展,对能源设备性能的要求越来越高^[1-3]。燃油离心泵作为航空发动机的重要供油部件,其工作性能及可靠性的优劣直接影响发动机的工作性能和工作状态。由于严酷的飞行条件、大范围的飞行包线等要求,使得离心泵容易发生空化,导致产生汽蚀,易使发动机在大机动飞行时出现供油不稳定甚至断油等故障,严重危害飞行安全^[4-5]。因此,科研人员不得不设计出性能优越的先进燃油泵,以满足高效率、抗汽蚀、可靠性高等重要性能指标,为新一代航空燃油泵发展奠定基础。

当前,国内外针对离心泵的高效优化设计开展了大量研究工作。这些优化设计方法包括:试验优化设计、速度系数法优化设计、基于代理模型的优化设计和基于损失模型的优化设计等^[6-7]。过度依赖试验数据及速度系数法优化设计难以建立外特性性能指标与几何结构参数间的内在关联,对离心泵设计的优化指导不足。基于代理模型的优化设计需要对所建立的代理模型进行大量的试验修正,使得模型精度符合要求,对模型的依赖较大。而基于损失模型的离心泵优化设计方法,可建立离心泵外特性性能参数、几何结构参数,甚至流动状态参数三者之间的显式或隐式关系。既而基于试验数据的对比验证,实现对离心泵结构参数高效优化设计。因此,进行燃油离心泵基于损失模型的优化设计有重要的意义。

国外针对离心泵损失模型下的优化设计做了很多工作。Safikhani等^[8]在Numeca仿真环境下仿真得到了离心泵的效率 and 必需汽蚀余量数据,结合类型神经网络方法GMDH(Group Method of Data Handling)和遗传算法GA(Genetic Algorithm)完成了多目标优化。Ahmad等^[9]同样在仿真数据的基础上,分别采用了多目标粒子群优化算法MOPSO(Multi-Objective Particle Swarm Optimization Method)和GA进行多目标优化求解,通过仿真对比验证了MOPSO的有效性。Omar等^[10]基于泵内的能量损失计算式,建立了

离心泵扬程、效率和几何结构参数间的数学关系,进而对两种型号的离心泵进行了仿真,验证了基于损失模型的离心泵优化设计的有效性。国内学者也纷纷进行了相关研究,吴达人等^[11]针对3B-33离心叶轮,以效率为目标进行了优化设计,其中考虑了管道沿程损失和局部损失形式下的叶轮水力损失。何希杰等^[12]为了提高中低比转速离心叶轮效率,以叶轮外径为设计参数,首次将遗传算法应用到离心泵优化设计。黄思等^[13]建立了离心泵的多目标多变量优化数学模型,利用Matlab遗传算法工具箱进行了最优求解。此外,高江永^[14]、唐卫卫^[15]、李华^[16]、朱柏林^[17]等均对基于损失模型的离心泵优化设计进行了深入研究,并取得一定的研究成果。

然而,由于航空燃油离心泵特殊的运行条件,相比其它行业,其损失、汽蚀问题更为突出。目前针对航空燃油离心泵的多目标优化设计研究却相对较少,因此兼顾两个高效与抗汽蚀多目标的优化设计很有意义。同时,上述优化方法大多数采用遗传算法GA、粒子群算法PSO(Particle Swarm Optimization Method)等。但是,与其它方法相比,序列二次规划算法SQP作为最基本、最经典的优化算法之一,能够有效降低优化维数,且不需要复杂的自适应算法等,更利于真实发动机的实时控制,在其它工业领域取得了很满意的优化效果^[18-19],却很少应用在离心泵的优化设计中。因此本文基于SQP算法下进行了燃油离心泵多目标优化设计研究。

2 多目标优化整体方案

离心泵效率计算是其性能优化的重要部分。其中,影响离心泵效率的损失较多,包括:水利损失、容积损失和机械损失。另一方面,由于航空发动机大包线飞行过程中,燃油离心泵作为前级增压泵,其工作条件变化复杂,导致汽蚀问题更是突出。因此,为了建立燃油离心泵设计参数、结构参数、多个效率以及汽蚀余量等关系,考虑多个损失和汽蚀等多目标,基于综合损失模型进行燃油离心泵多目标优化。整体方案如图1所示。燃油离心泵传统设计方法需要经过反复多次的性能试验,才能得到合适的水力设计模

型。其高效低损失、强抗汽蚀性能等均需大量考虑经验来完成参数设计。因此,基于损失模型,采用SQP算法下的优化设计方法可以同时兼顾多个损失和汽蚀,以高效的多目标优化为指导进行直接迭代优化。

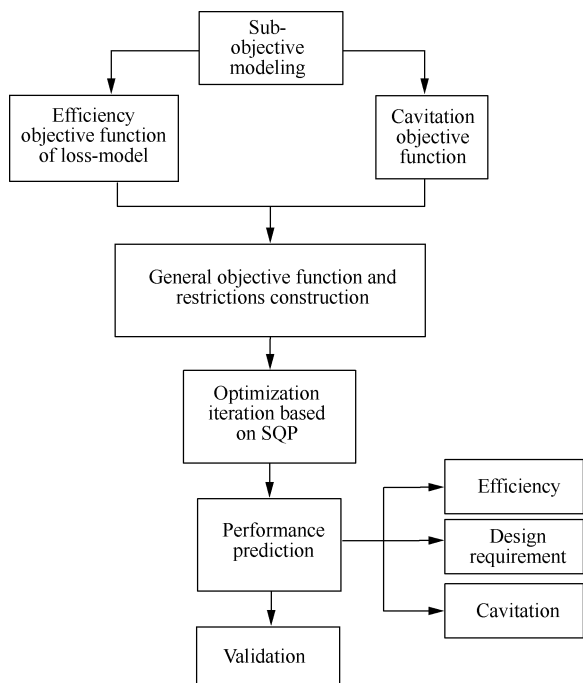


Fig. 1 Overall program

SQP算法对于非线性约束最优化问题是一个非常有效的算法,将原始问题转化为一组二次规划的子问题进行求解。对于燃油离心泵多目标优化问题,可以用下式来表示。

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} g_i(\mathbf{x}) \leq 0 & i = 1, \dots, m \\ h_j(\mathbf{x}) = 0 & j = 1, \dots, l \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $f(\mathbf{x})$ 为优化目标函数, $g_i(\mathbf{x})$ 和 $h_j(\mathbf{x})$ 分别为非线性的不等式与等式约束条件,优化向量 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$ 。 $f(\mathbf{x})$ 可分别表示为离心泵的多个损失模型目标函数和必需汽蚀余量目标函数之和,即

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^3 \eta_i(\mathbf{x}) + n(\mathbf{x}) \quad (2)$$

式中 $\eta_i(\mathbf{x})$ 为各个效率目标函数, $n(\mathbf{x})$ 为必需汽蚀余量目标函数。

在式(1)中,将反映离心泵各个损失的损失模型分量与反映汽蚀性能的必需汽蚀余量分量建立函数表达,目的是建立性能参数、结构参数间的关系。其中, $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$ 是结构参数的集合,即满足约束条件的数学规划模型可行解。

3 基于SQP的多目标优化设计

3.1 多目标函数及约束条件

燃油在离心泵内部流动中,存在能量损失,影响了运行效率。这些损失包括水力效率 η_h ,容积效率 η_v 以及机械效率 η_m 。效率对映的三种损失:水力损失 l_h ,容积损失 l_v 和机械损失 l_m ,可通过下式得到

$$\begin{cases} \eta_h = 1 - l_h \\ \eta_v = 1 - l_v \\ \eta_m = 1 - l_m \end{cases} \quad (3)$$

另一方面,由于高空全包线飞行的影响,使得燃油离心泵的汽蚀问题突出。本节分别建立各个损失模型下的分目标函数以及必需汽蚀余量分目标函数。并采用层次分析法完成对分目标函数的权重考虑,建立总目标函数。最后,确定合理的约束条件,以完成优化设计。

3.1.1 基于水利损失模型下的分目标函数

水力损失包括吸入段水利损失、叶轮内部水力损失、蜗壳内部水力损失以及扩散段水利损失。由于燃油离心泵受叶轮和蜗壳影响较大,因此此处仅考虑叶轮内部和蜗壳内部的水利损失。

叶轮内部水利损失 l_{hi} 包括水利摩擦损失 l_{hfi} 和水利动力损失 l_{hdi} ,即

$$l_{hi} = l_{hfi} + l_{hdi} \quad (4)$$

利用沿程损失可以计算叶轮内流动的水力摩擦损失为

$$l_{hfi} = \lambda \times \frac{L}{D_h} \times \frac{w^2}{2gH_{th}} \quad (5)$$

式中 λ 为摩擦损失系数, L 为叶轮流道等效长度, D_h 为叶轮平均当量水力直径, w 为叶轮内平均相对速度, H_{th} 为离心泵理论欧拉扬程。

通过加权平均方法可得叶轮平均当量水力直径为

$$D_h = (D_1 + 2D_m + D_2)/4 \quad (6)$$

式中 D_1 为叶轮进口直径, D_m 为叶轮流道中间位置的当量水力直径, D_2 为叶轮出口直径。

离心泵叶轮内水力动力损失 l_{hdi} 包括冲击损失 l_s 及尾迹损失 l_w ,均可通过局部损失来进行表述。冲击损失 l_s 的大小与叶轮进口相对速度的平方成正比,即

$$l_s = \zeta_s w_{u1}^2 / 2g \quad (7)$$

式中 ζ_s 为冲击损失系数, w_{u1} 为叶轮进口相对速度。

同理,尾迹损失 l_w 的大小与叶轮出口绝对速度的

平方成正比,即

$$l_w = \zeta_w c_{m2}^2 / 2g \quad (8)$$

式中 ζ_w 为尾迹损失系数, $c_{m2} = Q/A_2$, Q 为体积流量, A_2 为叶轮出口流道断面面积。

因此,由式(7)与式(8)得到叶轮内水力动力损失 l_{hdi} 为

$$l_{hdi} = l_s + l_w = \zeta_s w_{u1}^2 / 2g + \zeta_w c_{m2}^2 / 2g \quad (9)$$

另一方面,蜗壳内的水力损失 l_{hv} 同样包括摩擦损失 l_{hfv} 和动力损失 l_{hdv} 两部分。同样通过沿程损失和局部损失进行计算,即

$$l_{hfv} = \sum_{i=1}^m \left[\lambda_{c\theta} \frac{c_{\theta}^2}{2g} \Delta S_{cT} \right]_i \times \frac{1}{A_4} \quad (10)$$

$$l_{hdv} = \frac{\eta_v^2 (c_{m2}')^2}{2g} \left(\frac{D_2}{D_3} \right)^2 \left(\frac{b_2}{b_3} \right)^2 \quad (11)$$

式中 $\lambda_{c\theta}$ 为蜗壳内摩擦损失系数, c_{θ} 为蜗壳内部流动的局部速度, ΔS_{cT} 为蜗壳每一部分的表面积, A_4 为蜗壳喉部截面面积, η_v 为离心泵叶轮的容积效率, 叶轮出口绝对速度 $c_{m2} = u_2 \phi_2$ 。 ϕ_2 为叶轮出口流量系数, D_2 为叶轮出口直径, D_3 为泵出口直径, b_2 为叶轮出口宽度, b_3 为蜗壳进口宽度。

由式(10)与式(11)得到叶轮内水力动力损失 l_{hdi} 为

$$l_{hv} = l_{hfv} + l_{hdv} \quad (12)$$

既而,由上述表达式可得基于水力损失模型下的分目标函数 $\eta_1(x)$ 为

$$\eta_1(x) = \eta_h(x) = 1 - l_h(x) \quad (13)$$

式中选取 $D_1, b_1, D_2, b_2, D_3, b_3$ 等六个参数作为数学模型的设计变量。

3.1.2 基于容积损失模型下的分目标函数

航空燃油离心泵多为半开式叶轮,因此,以半开式叶轮的泄漏损失为对象。泄漏损失主要是由于叶片顶部与泵壳之间存在间隙,叶片工作面与背面存在压力差,导致液体从工作面高压区泄漏到叶片背面的低压区,造成一定的损失。半开式叶轮泄漏流量为

$$Q_s = \mu A \sqrt{2g\Delta H_{b_c}} = \mu z l_c \times b_c \sqrt{2g\Delta H_{b_c}} \quad (14)$$

式中 μ 为叶顶间隙泄漏流量系数,近似取为 0.55; z 为叶片数; l_c 为叶片间隙长度,即叶片顶部流线条长度,近似计算取 $l_c = L$; b_c 为径向间隙宽度,即叶顶与泵壳之间的距离; ΔH_{b_c} 为叶片工作面与背面的扬程之差。

忽略轴封泄漏与平衡装置造成的泄漏等因素,

通过以上分析,获得了泄漏流量 Q_s 与主要设计参数之间的关系,因此容积效率为

$$\eta_v = 1 - \mu D_i \times cl \sqrt{2\psi_2 \Delta H_{cl} / H_{th}} / (D_2 b_2 \phi_2) \quad (15)$$

由上述表达式可得基于容积损失模型下的分目标函数 $\eta_2(x)$, 即

$$\eta_2(x) = \eta_v(x) = 1 - l_v(x) \quad (16)$$

式中可选取 D_2, b_2 两个参数作为该数学模型的设计变量。

3.1.3 基于机械损失模型下的分目标函数

机械损失主要包括轴封机械损失和轴承摩擦损失。其中,采用机械密封方式时,轴封机械损失 P_{m1} 可为 $(1\% \sim 2\%)P_{th}$ 。

轴承的摩擦损失主要由轴承类型决定。滚动轴承机械损失 P_{m2} 可选为

$$P_{m2} = 1\% \times P_{th} \quad (17)$$

通过式(16)和式(17)可得燃油离心泵的机械损失 P_m 及效率 η_m , 分别为

$$\begin{cases} P_m = P_{m1} + P_{m2} \\ \eta_m = 1 - P_m / P_{th} \end{cases} \quad (18)$$

因此,由上述表达式可直接计算基于机械损失模型下的分目标函数 $\eta_3(x)$, 此值为计算值 η_3 。

3.1.4 基于必需汽蚀余量下的分目标函数

由于航空发动机的大机动、全包线飞行使得作为燃油系统进口增压泵的离心泵必须适应多变且恶劣的工作环境,尤其是进口环境。这就导致了汽蚀问题的加剧。从而迫使泵的性能降低,衍生出噪声和振动等现象,危害离心泵的工作寿命甚至发动机的可靠性。为了在严酷工作条件下尽可能地避免汽蚀问题的产生,需要优化效率的同时,兼顾离心泵的抗汽蚀特性。一般,离心泵的抗汽蚀特性可用必需汽蚀余量 N_r 表示,即

$$N_r = \frac{c_0^2}{2g} + \zeta \frac{w_0^2}{2g} \approx \frac{c_1^2}{2g} + \zeta \frac{w_1^2}{2g} \quad (19)$$

式中 c_1 为叶片进口绝对速度, w_1 为叶片进口相对速度, ζ 为叶片进口压降系数。

当泵的进口压力与工作介质饱和蒸汽压力一定时,叶轮进口处速度越大,离心泵必需汽蚀余量 N_r 越大,离心泵的抗汽蚀性能则相对较差。因此,为了使得汽蚀性能优良,则需要必需汽蚀余量最小。因此,以必需汽蚀余量 N_r 最小为分目标函数。代入各速度的表达式,可得

$$n(x) = \frac{1}{2g} \left[\frac{16Q_T^2}{\pi^2 D_1^4} + \frac{\lambda Q_T^2}{b_1^2 (\pi D_1 - z S_{u1})^2} + \frac{\lambda \pi^2 D_1^2 n^2}{60^2} \right] \quad (20)$$

式中 Q_T 为泵的实际流量, D_1 为叶轮进口直径, b_1 为进口宽度, z 为叶片数目, S_{u1} 为叶片出口周向厚度。同时, 可选取 D_1, b_1, S_{u1} 三个参数作为该数学模型的设计变量。

3.1.5 层次分析总目标函数及约束条件确定

上述分析可知, 需要通过水力损失、容积损失、机械损失以及必需汽蚀余量, 共同确定总目标函数。离心泵的优化数学模型目标函数是以获得最大离心泵效率、最小必需汽蚀余量为目标, 离心泵效率和抗汽蚀性能不仅受不同层次多种因素的影响, 且各影响因素之间存在一定的矛盾。如: 叶轮水力效率越高, 叶轮出口扬程越大, 导致密封环进出口压力差增大, 泵容积效率下降等。因此, 该目标是一个综合的权重性能指标。

基于以上分析, 需寻找该多目标优化问题的最优解。采用层次分析法中的方根法构造子目标函数。基于机械损失的分目标为计算定值, 因此仅包括基于水力损失、容积损失、以及必需汽蚀余量的分目标, 即

$$f(x) = \sum_{i=1}^2 b_i (\eta_i(x) - 1)^2 + b_3 n(x) \quad (21)$$

式中, 通过构造判断矩阵来进行权重向量 b 的计算, 有

$$b = [-0.4311 \quad -0.2844 \quad 0.2844]^T$$

此处由于篇幅在此不阐述判断矩阵这一方法。

由式(13), (16), (20), (21)可知, 影响离心泵效率和汽蚀的相互独立的参数有: 叶轮进出口直径 D_1, D_2 , 进出口宽度 b_1, b_2 , 泵出口直径 D_g , 蜗壳进口宽度 b_3 , 叶片数目 z 以及叶片出口周向厚度 S_{u1} 等, 叶片进出口周向厚度以及一些系数在设计之初按照经验给定。因此, 选取 $D_1, b_1, D_2, b_2, D_3, b_3$ 六个参数作为总目标函数的设计变量, 即

$$x = [D_1, b_1, D_2, b_2, D_3, b_3]^T = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T \quad (22)$$

基于SQP算法下的燃油离心泵多目标优化中, 建立的总目标函数为使得式(21)最小, 即 $\min f(x)$ 。

优化设计过程中需要对设计变量进行约束, 否则, 变量取值范围过窄会使优化点遗漏, 变量取值范围过大使得所获取的最优解仅仅是理论最优解, 可能会导致其它性能恶化, 如: 扬程降低。将设计变量

取值范围进行约束, 约束条件为

$$\begin{cases} 3.5 \sqrt[3]{Q/n} \leq D_1 \leq 5.5 \sqrt[3]{Q/n} \\ \frac{Q}{5.5 \sqrt[3]{Q/n} K_{m1} \sqrt{2gH}} \leq b_1 \leq \frac{Q}{3.5 \sqrt[3]{Q/n} K_{m1} \sqrt{2gH}} \\ 0.62 \left(\frac{n_s}{100} \right)^{5/6} \sqrt[3]{Q/n} \leq b_2 \leq 0.8 \left(\frac{n_s}{100} \right)^{5/6} \sqrt[3]{Q/n} \\ 8.5 \left(\frac{n_s}{100} \right)^{-0.5} \sqrt[3]{Q/n} \leq D_2 \leq 11 \left(\frac{n_s}{100} \right)^{-0.5} \sqrt[3]{Q/n} \\ 11 \left(\frac{n_s}{100} \right)^{-0.5} \sqrt[3]{Q/n} \leq D_3 \leq 13 \left(\frac{n_s}{100} \right)^{-0.5} \sqrt[3]{Q/n} \\ 0.8 \left(\frac{n_s}{100} \right)^{5/6} \sqrt[3]{Q/n} \leq b_3 \leq \left(\frac{n_s}{100} \right)^{5/6} \sqrt[3]{Q/n} \end{cases} \quad (23)$$

式中 n 表示离心泵转速, n_s 为离心泵比转速, K_{m1} 为叶轮进口轴面速度系数。

3.2 基于SQP的优化求解

选用工程设计中广泛应用的工程计算软件 Matlab 对数学模型进行优化, 得出最优解。利用文件编辑器, 将建立的优化数学模型和优化约束函数写入到能返回函数值的 M 文件中, 这样就把函数表达式写入 Matlab 系统中。最后在命令窗口执行 M 文件, 就可以得到优化解。其中, SQP 算法的编写步骤如图 2 所示。该算法的具体步骤为:

Step 1: 初始化。设置参数 $\alpha, \beta, \sigma \in (0, 1)$, $\gamma \in (0, +\infty)$, 获得初始点 $x_0 \in R^n$, 设置对称正定矩阵 $H_0 \in R^{n \times n}$, 计算约束函数初始梯度: $A_0 = \nabla g(x_0)$, $B_0 = \nabla h(x_0)$ 。

Step 2: 计算搜索方向。对于当前迭代点 x_k , 计算目标函数与约束条件的梯度, 构造式(1)所示的二次规划子问题。对二次规划子问题进行求解, 得到当前迭代点 x_k 处的可行性搜索方向 d_k 为

$$\begin{aligned} \min \quad & \nabla f(x_k)^T d_k + \frac{1}{2} d^T H_k d_k \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} g_i(x_k) + A_k d_k \leq 0 \\ h_j(x_k) + B_k d_k = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

式中 $A_k = \nabla g(x_k)$, $B_k = \nabla h(x_k)$ 。

H_k 为 $f(x)$ 在迭代点 x_k 处的 Hessian 矩阵。通过对式(24)所示二次规划子问题的求解, 可以得到迭代点 x_k 处的最优 d_k 。若 $\|d_k\| \leq \varepsilon$ 则计算停止, 此时可获得原问题的一个近似点, 否则, 进行下一步计算。

Step 3: 自变量更新。通过式(24)的求解得到当前搜索方向 d_k 后, 更新迭代点 x_k

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (25)$$

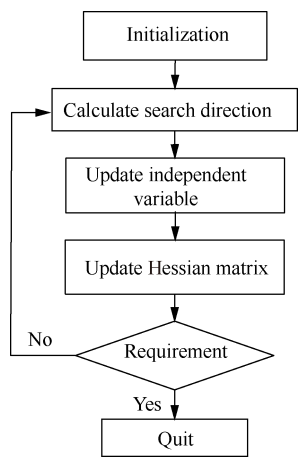


Fig. 2 Calculation steps of improved SQP algorithm

式中 α_k 为搜索步长, 为了保证 SQP 算法的全局收敛性, 通常借助价值函数来确定搜索步长。例如: 目标函数、罚函数和增广拉格朗日函数都可以用作价值函数来衡量搜索性能。本文中选择式 (25) 所示增广拉格朗日函数作为价值函数来确定搜索步长, 搜索步长 α_k 为满足式 (26) 的最大值。

$$G(\mathbf{x}, \mu, \sigma) = f(\mathbf{x}) - \sum_{i=1}^m \mu_i h_i(\mathbf{x}) - \sum_{j=1}^l \sigma_j g_j(\mathbf{x}) \quad (26)$$

$$G(\mathbf{x}_{k+1}) - G(\mathbf{x}_k) \leq \alpha_k G'(\mathbf{x}_k) \quad (27)$$

Step 4: Hessian 矩阵更新。

$$\mathbf{s}_k = \alpha_k \mathbf{d}_k \quad (28)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_k = \nabla G(\mathbf{x}_{k+1}) - \nabla G(\mathbf{x}_k) \quad (29)$$

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k - \frac{\mathbf{H}_k \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k} + \frac{\boldsymbol{\gamma}_k \boldsymbol{\gamma}_k^T}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{s}_k} \quad (30)$$

式中 $\boldsymbol{\gamma}_k = \phi_k \boldsymbol{\varphi}_k + (1 - \phi_k) \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k$, 参数 ϕ_k 定义为

$$\phi_k = \begin{cases} 1 & \mathbf{s}_k^T \boldsymbol{\varphi}_k \geq 0.2 \mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k \\ \frac{0.8 \mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k}{\mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k - \mathbf{s}_k^T \boldsymbol{\varphi}_k} & \mathbf{s}_k^T \boldsymbol{\varphi}_k < 0.2 \mathbf{s}_k^T \mathbf{H}_k \mathbf{s}_k \end{cases} \quad (31)$$

最后, 基于传统的速度系数法设计结果, 采用 SQP 算法进行燃油离心泵多目标优化设计。

4 燃油离心泵多目标优化设计

4.1 研究对象

选择航空燃油离心增压泵^[20]作为研究对象, 该型泵为单级叶轮、单级蜗壳结构, 叶轮为半开式半闭式结构。作为航空发动机燃油系统的前级增压泵, 其具体的性能指标: 工作介质为航空煤油 (RP-3), 密度 ρ 为 753 kg/m³, 泵转速 N_d 为 8×10³ r/min, 流量 Q_d 为 7.7×10⁴ L/h, 泵进出口压差 Δp 为 0.956 MPa, 扬程 H 为 127.6 m, 比转速 n_s 为 207。

基于上述性能参数, 利用传统的速度系数法进

行反复多次迭代设计确定原型结构, 并作为优化设计初值。该泵的几何尺寸等具体数据如表 1 所示。表 1 中, D_d 为基圆直径, β_1 为进口叶片安放角, β_2 为出口叶片安放角, a 为进口叶片宽。

Table 1 Prototype structure geometry

Parameter	Value	Parameter	Value
H/m	127.6	b_2/mm	7.5
n_s	207	Z	6
D_d/mm	52	$\beta_1/(\circ)$	22
η	0.78	$\beta_2/(\circ)$	21
D_1/mm	26	D_3/mm	43
b_1/mm	14.5	b_3/mm	8
D_2/mm	41	a/mm	2

4.2 优化算法结果分析

参照参考文献中已经实现的离心泵优化算法 GA 算法和 PSO 算法, 本文采用 SQP 算法对该型燃油离心泵进行优化设计, 与上述两个算法进行对比。图 3 给出了三种方法的迭代结果。

由图 3 可以看出: SQP 算法收敛步数更快, 求解迭代第 10 步就能够达到收敛要求, 得到优化求解结果。因此, 相较 GA, PSO 等已经采用的典型的优化算法而言, 三者的优化结果基本类似, 但在对于多维非线性方程组的迭代求解过程中, SQP 减少了迭代步数, 效率较高。

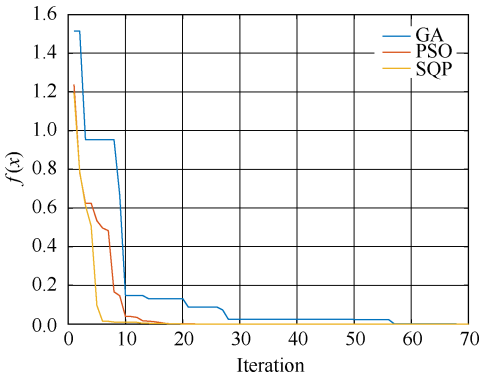


Fig. 3 Comparisons of results among SQP, PSO and GA

为了清晰地给出 SQP 算法的寻优效果, 图 4 给出了该方法在寻优迭代过程中, 各个分目标的迭代过程及寻优结果。

从图 4 中能够看出, 基于 SQP 算法, 效率和必需汽蚀余量在第 10 步得到了收敛, 与图 3 的结果呼应, 有效地实现效率最高、必需汽蚀余量最小的目标要求, 且收敛速度符合要求。

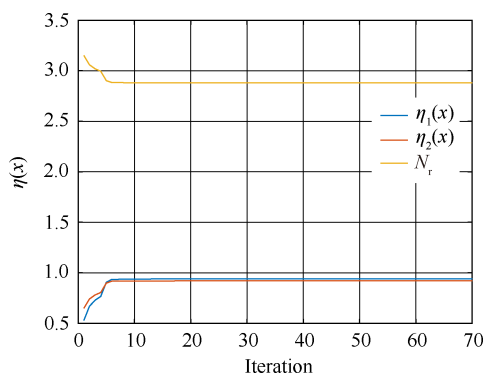


Fig. 4 Iteration process for multi-objectives with SQP

4.3 仿真验证

通过上述三种算法的对比看到了所提出的SQP算法的优势,为了验证该方法在燃油离心泵几何优化的有效性,利用优化结果进行仿真验证^[21],对比优化后与利用传统方法设计的原型泵的外特性结果。通过SQP算法进行迭代寻优确定了离心泵几何尺寸的最优解,所选取的变量组合最优结果如表2所示。

Table 2 Optimization results of variable parameters

Parameter	Tradition result	Optimization result
D_1/mm	26.0	22.8
b_1/mm	14.5	16.5
D_2/mm	41.0	38.0
b_2/mm	7.5	7.8
D_3/mm	43.0	41.1
b_3/mm	8.0	8.6

进口处的网格数为115847,叶轮的网格数为243357,蜗壳的网格数为175922,整个计算区域的网格数为535126。网格划分完成之后,进行了网格独立性检查,证明了所划分网格的正确性,其网格等角斜率 <0.9 ,且网格质量符合要求。根据表2的结果,进行燃油离心泵的三维模型和网格模型建模,建模结果如图5所示。在UG环境下建立该型离心泵计算域模型(图5(a)),在PUMPLINX环境下划分自动网格模型(图5(b))。

在进口压力0.1MPa下,分别在 $0.8Q_d$ 、 Q_d 、 $1.2Q_d$ 三

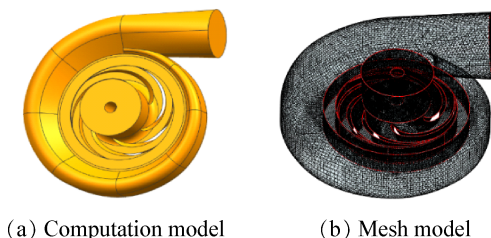


Fig. 5 Results of models

种工况下进行燃油离心泵的内流场仿真计算, $Q_d=7.7\times 10^4\text{L/h}$ 。三个工况下传统设计方法的原型离心泵和基于SQP算法优化的离心泵总压分布如图6所示。

从图6可以看出,两种设计结果中,泵的整体流动趋势基本一致,从泵进口到蜗壳出口的压力变化趋势基本相似。在各个运行工况下,基于SQP优化后的离心泵叶轮各流道内,流动具有一定的周期性。在叶片进口处无明显的回流现象,有利于抗汽蚀性能的提高,这与优化目标相符。在叶片出口区域,存在一定范围的尾迹流动,但相比传统方法设计的原型离心泵,程度较弱。

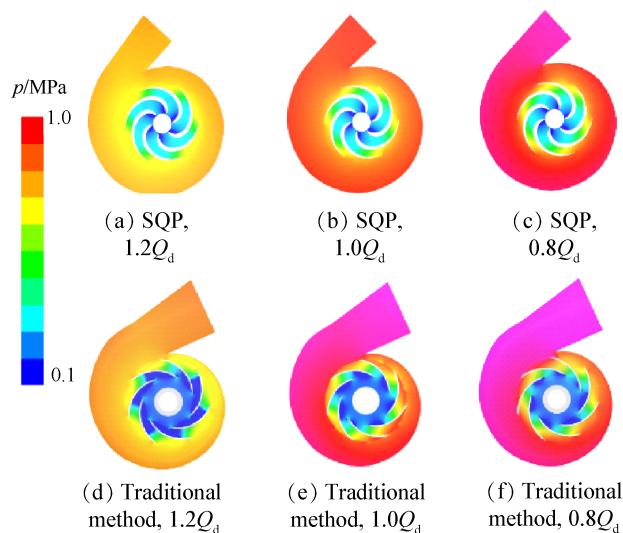


Fig. 6 Pressure distribution

此外,基于SQP算法优化的离心泵叶轮外径更大,其增压效果更好。在叶轮向蜗壳过渡区域,基于SQP算法优化的离心泵的叶轮出口压力过渡更加平稳,无明显的压力损失,尤其在蜗壳隔舌区域,优化泵的低压区域更小。因此,从内流场的压力仿真结果来看,基于SQP算法优化的离心泵其流动损失更低,且进口流动有利于抗汽蚀性能,均与优化目标相符。

根据 $0.4Q_d$ 、 $0.6Q_d$ 、 $0.8Q_d$ 、 $1.0Q_d$ 、 $1.2Q_d$ 、 $1.4Q_d$ 六个运行工况的仿真结果,预测两种方法设计的离心泵的效率 and 抗汽蚀性能。按下式预测离心泵的实际效率为

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{P \times 1000} \quad (32)$$

式中 Q 为实际流量, H 为扬程, P 为轴功率。

当离心泵产生汽蚀现象时,一段时间后导致其扬程降低,随着汽蚀的发展,扬程下降值增大。其必需汽蚀余量与扬程有一定的关系,按下式预测离心

泵的必需汽蚀余量为

$$N_r = H_1 + p_a/(\rho g) - p_v/(\rho g) \tag{33}$$

式中 H_1 为泵进口扬程, p_a 为大气压力, p_v 为一定温度下介质的饱和蒸汽压。

根据式(29)、式(30)分别预测两种设计方法下的燃油离心泵效率和必需汽蚀余量,预测结果如表 3 所示。

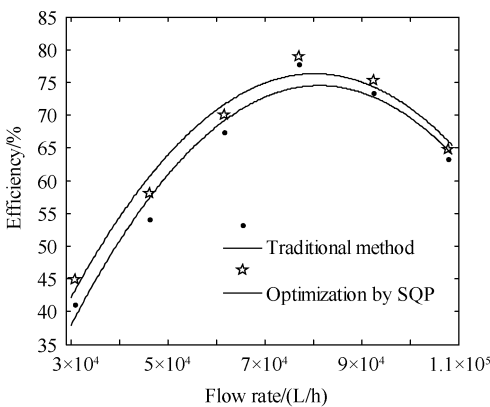
Table 3 Prediction results of efficiency

Flow rate/ (L/h)	Efficiency/%		N_r /m	
	Tradition	Optimization	Tradition	Optimization
30800	41.10	44.93	3.32	2.69
46200	54.08	58.00	3.59	2.95
61600	67.35	69.97	3.91	3.34
77000	77.80	78.92	4.16	3.60
92400	73.38	75.26	4.71	4.35

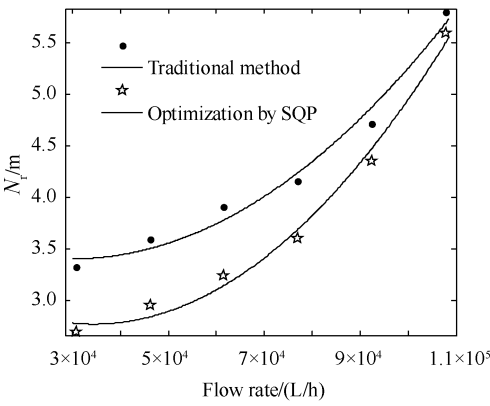
从表 3 中可以看到,优化后的离心泵效率有所升高,必需汽蚀余量有所减少,与多优化目标相符合。其中小流量工况的优化百分比比较高,大流量工况的优化百分比相对较小。由于离心泵一般在小流量工况下效率较低,优化结果保证了高效工作区域的扩大。根据表 3 完成两种方法设计的离心泵的流量-效率、流量-必需汽蚀余量曲线,见图 7。

从图 7(a)可以看出,两种方法设计的离心泵效率随流量变化趋势基本相似,且到设计流量 Q_d 下,效率最高,即该点为该型离心泵的最佳效率点(BEP)。此外,基于传统方法设计的原型离心泵高效工作区域较窄,尤其是大流量工况下,离心泵效率下降较快;而基于 SQP 算法优化的离心泵其高效工作区域较为宽广,在小流量工况下的效率有所提高。且大流量工况下,其效率下降较为缓慢。因此,从效率预测结果来看,基于 SQP 算法优化的离心泵其高效工作区域宽,与内流场分布仿真结果及优化目标相符。

从图 7(b)可以看出,两种方法设计的离心泵必需汽蚀余量随流量的增大而增大,且增加的幅度越来越大,在大流量时,必需汽蚀余量最大,两个离心泵的必需汽蚀余量均符合要求,泵不会产生汽蚀现象。然而,相比传统方法设计的原型离心泵,基于 SQP 算法优化的离心泵的必需汽蚀余量更低,证明其在恶劣入口环境下的吸入能力更强,离心泵的抗汽蚀性能更优。因此,从必需汽蚀余量预测结果来看,基于 SQP 算法优化的离心泵在同等工作条件下,其抗汽蚀性能更优,与内流场分布仿真结果及优化目标相符。



(a) Flow rate-efficiency curve



(b) Flow rate- N_r curve

Fig. 7 Performance curves of centrifugal pump

5 结 论

本文以航空燃油离心泵为背景,进行了基于综合损失模型的多目标优化设计与仿真分析研究,主要结论如下:

(1)对所确定的 SQP 优化算法进行了优化结果分析,通过与 GA 算法的对比表明,两个算法的最优结果几乎相似,但 SQP 迭代步数更少。

(2)对燃油离心泵进行了优化设计,并与传统方法设计的原型泵进行了对比。仿真结果表明:基于 SQP 算法优化的离心泵内部流动更加平稳,进口流动、隔舌处流动更加顺畅;从外特性结果来看,基于 SQP 算法优化的离心泵高效工作范围更宽,且必需汽蚀余量较小。

(3)通过研究结果证明,基于综合损失模型的燃油离心泵设计能够实现高效、抗汽蚀的多个优化目标,具有一定的工程应用价值。

致 谢:感谢陕西省自然科学基金青年项目、中央高校青年项目以及国家科技重大专项的资助。

参考文献

[1] 刘尚勤. 离心泵用作航空发动机主燃油泵研究[J]. 航

- 空发动机, 2006, 32(2): 43-45.
- [2] 樊思齐. 航空发动机控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [3] 周宗才. 某型飞机推进系统控制[M]. 西安: 空军工程学院, 1997.
- [4] Jaw L C, Mattingly J D. 飞机发动机控制: 设计、系统分析和健康监测[M]. 张新国等, 译. 北京: 航空工业出版社, 2012.
- [5] 刘尚勤, 王 磊. 航空发动机的一种新型主燃油泵设计[J]. 航空发动机, 2003, 29(2): 5-7.
- [6] 刘显为, 李华聪, 史新兴, 等. 基于离子群算法的航空离心泵复合叶轮优化设计研究[J]. 推进技术, 2019, 40(8): 1743-1751. (LIU Xian-wei, LI Hua-cong, SHI Xin-xing, et al. Optimization Design of Composite Impeller of Aero-Centrifugal Pump Based on Particle Swarm Optimization[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(8): 1743-1751.)
- [7] 杨军虎, 边 中, 钟春林, 等. 基于水力损失计算的离心泵叶轮叶片出口角选择方法[J]. 水泵技术, 2015, (3): 9-13.
- [8] Safikhani H, Khalkhali A, Farajpoor M. Pareto Based Multi-Objective Optimization of Centrifugal Pumps Using CFD, Neural Networks and Genetic Algorithms[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2011, 5(1): 37-48.
- [9] Ahmad N, Hamed S, Shahram D. The Comparison of Multi-Objective Particle Swarm Optimization and NSGA II Algorithm: Applications in Centrifugal Pumps[J]. *Engineering Optimization*, 2011, 43(10): 1095-1113.
- [10] Omar A K, Khaldi A, Ladouani A. Prediction of Centrifugal Pump Performance Using Energy Loss Analysis[J]. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 15(3): 210-221.
- [11] 吴达人, 景思睿, 陈胜利, 等. 离心泵叶轮的优化设计[J]. 水动力学研究与进展, 1988, (4): 31-38.
- [12] 何希杰, 朱广奇, 劳学苏. 遗传算法在离心泵优化设计中的应用[J]. 排灌机械工程学报, 2008, 26(2): 40-44.
- [13] 黄 思, 宋志光, 张雪娇, 等. 离心泵多目标多变量优化设计模型实用化研究[J]. 中国农村水利水电, 2014, (5): 130-132.
- [14] 高江永. 离心泵叶轮与蜗壳参数优化设计的研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2008.
- [15] 唐卫卫. 离心水泵的优化设计及其仿真[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2011.
- [16] 李 华. 基于水力损失模型的汽车水泵性能预测的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [17] 朱柏林. 基于遗传算法的离心泵优化设计及其性能分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- [18] 周 红, 王占学, 刘增文, 等. 双外涵变循环发动机可变几何特性研究[J]. 航空学报, 2014, 35(8): 2126-2135.
- [19] 聂友伟, 李秋红, 王 元, 等. 基于SQCQP算法的变循环发动机性能寻优控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(12): 2564-2572.
- [20] 彭茂林, 杨自春, 曹跃云, 等. 基于贝赛尔曲线和粒子群算法的涡轮叶片型线参数化建模[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(32): 101-108.
- [21] 李 嘉, 李华聪, 王淑红, 等. 一体式多级导流诱导轮与叶轮型线优化研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(5): 953-960.

(编辑: 朱立影)