

液体火箭发动机用超低比转速离心泵优化设计

郭 维, 白东安

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 在采用加大流量法等优化措施的同时, 运用 FLUENT 流体计算软件及 GAMBIT 前处理软件, 采用三维 $K-\varepsilon$ 双模型方程对泵内部流场进行模拟仿真, 再从优化泵内流动特性的角度出发, 确定合理的优化措施, 设计了一台高扬程、高转速、高效率、能在大流量范围稳定工作的液体火箭发动机用超低比转速离心泵。对比试验验证表明, 这种结合内流场特性的优化设计是可行的, 而且快速高效。

关键词: 液体火箭发动机; 超低比转速; 离心泵; 优化设计; 内流场分析

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 05-0019-05

Optimal design of ultra-low specific speed centrifugal pump for LRE

GUO Wei, BAI Dong-an

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The 3-D $K-\varepsilon$ dual-model equation was adopted to simulate the inner flow field of the centrifugal pump, while the optimization measures such as the method of increasing flow of the pump and so on were employed. A high-lift, high-speed, ultra-low specific speed and high-performance centrifugal pump for LRE was designed with FLUENT flow calculation software and GAMBIT predisposing software by adopting the appropriate optimum measures. The results of hydraulic test indicate that the performance of the pump is excellent, and the optimal design method based on the computation of the centrifugal pump inner flow field is feasible and efficient.

Keywords: LRE; ultra-low specific speed; centrifugal pump; optimal design; inner flow field analysis

0 引言

涡轮泵是泵压式液体火箭发动机系统的“心脏”, 担负着向发动机推力室主系统及发生器等

副系统输送高压推进剂的重任, 涡轮泵性能的优劣对发动机系统的影响很大, 而离心泵特性的好坏决定着涡轮泵的性能。

离心泵设计过程中需要使用大量经验系数, 因而往往要经过反复优化设计, 使其各结构参数

收稿日期: 2011-05-23; 修回日期: 2011-07-16

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目

作者简介: 郭维 (1978—), 女, 工程师, 研究领域为流体机械与工程

达到最佳和谐工作状态才能获得一台性能优良的离心泵。传统的设计方案是在已有的性能较好的泵结构选型，根据需要调整各结构参数，加工生产后进行泵水力试验，用扬程、效率等外特性判断泵性能的优劣以及是否需要再优化设计。但外特性是泵各结构参数综合作用的结果，对于优化设计来说，仅有这些外特性参数不能精确定位优化机理，再优化措施存在盲目性和不确定性，因而常需要多次反复，事倍功半。

随着液体火箭发动机的发展，上面级发动机等越来越需要采用流量小、扬程高、转速高、性能和可靠性高的超低比转速离心泵。但超低比转速离心泵普遍具有效率偏低、工作稳定性差的问题，优化设计时更加需要采取准确的、具有针对性的合理优化措施，以尽可能提高泵的效率，拓展泵稳定工作的流量范围。为此，在设计一台液体火箭发动机用带前置诱导轮的高速高扬程小流量超低比转速离心泵时，运用 FLUENT 流体计算软件及 GAMBIT 前处理软件作为工具，采用三维 $K-\epsilon$ 双模型方程对其内部流场进行模拟仿真，从优化泵内流动特性的角度出发，根据模拟仿真结果，确定合理的优化措施，优化设计了一台高扬程、高效率、能在大流量范围稳定工作的超低比转速离心泵。

1 设计参数

根据发动机系统要求，泵转速 $n_w=35000 \text{ r/min}$ ，比转速 $n_s=22$ ，属于高速高扬程超低比转速离心泵。

2 优化前离心泵结构

对超低比转速泵来讲，用常规方法设计的泵存在效率偏低、小流量工况下工作不稳定现象，其典型性能曲线如图 1 所示。为了获得性能满足要求的离心泵，设计时已经采用了加大流量设计法及面积比原理等常用的低比转速离心泵优化设计方法^[1]，并将离心轮设计成大出口角 ($80^\circ < \beta_2 < 90^\circ$) 变曲率长短叶片相间的复合型离心轮 (见图

2)，离心轮前设置了等螺距诱导轮。

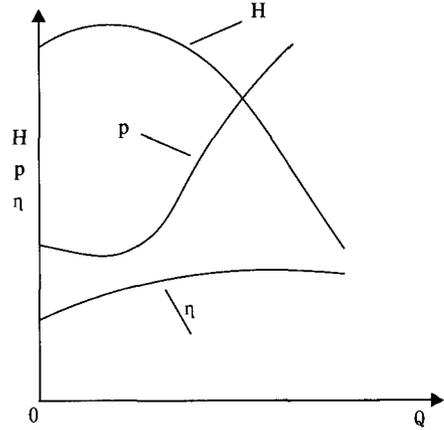


图 1 典型超低比转速离心泵性能曲线示意图
Fig. 1 Performance curves of typical ultra-low specific speed centrifugal pump

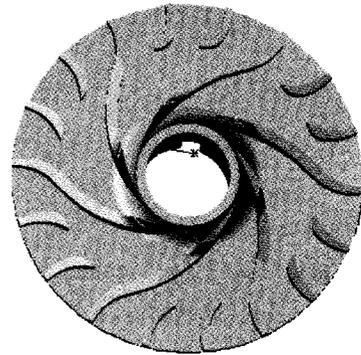


图 2 变曲率叶片复合离心轮
Fig. 2 Composite centrifugal wheel with variable curvature blades

3 泵内流场流动特性仿真分析

3.1 计算模型及边界条件

以从诱导轮进口到蜗壳出口整个泵内流场为计算区域，运用 GAMBIT 前处理软件进行三维建模和网格划分。针对计算域空间结构复杂，诱导轮、离心轮及蜗壳三大过流部件结构、尺寸及复杂程度不同，网格尺寸不便于统一的情况，采用适应性非常强的四面体非结构化体网格，分别对其单独划分网格，各过流部件内采用均匀的网格密度。计算区域网格模型如图 3 所示。

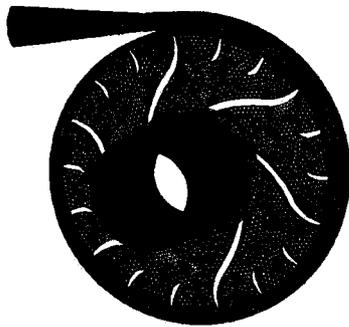


图 3 计算区域网格模型图

Fig. 3 Grid model of computational domain

泵内流场模拟主要的边界有进口边界、出口边界和壁面边界。

进口采用质量流量 (mass flow) 进口条件。出口采用压力出口条件。泵流场存在三类壁面边界条件: 轴和叶片以相同速度转动; 诱导轮及蜗壳的外壁在绝对坐标中静止不动; 离心轮的外边界条件即离心轮的前后盖板在绝对坐标系中与叶片、轴以相同速度旋转, 而相对于 fluid 流体坐标系则保持静止。

3.2 结果分析

仿真计算了容积流量 $Q=Q_0$ 额定工况点的泵内流动特性, 结果显示, 诱导轮与离心轮的连接面上存在明显的负压回流区 (见图 4 所示)。而从图 5 所示的离心轮旋转面粒子轨迹中也可以看到靠近蜗壳隔舌的长叶片附近有大量的回流和涡流现象, 此外在叶片间流道上有脱壁流, 尤其是从短叶片起至出口段脱流现象明显。

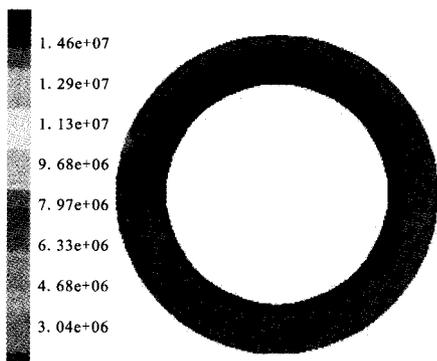


图 4 诱导轮与离心轮连接面总压分布

Fig. 4 Total pressure distribution of interface between centrifugal impeller and inducer

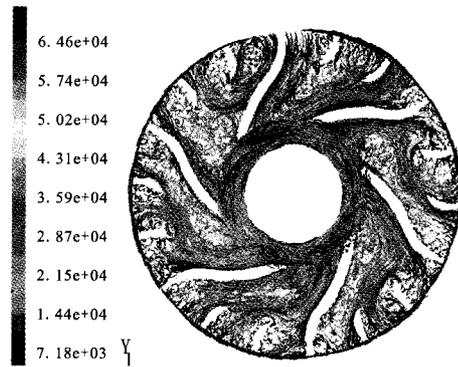


图 5 离心轮旋转面粒子轨迹图

Fig. 5 Particle tracking for rotating surface of centrifugal impeller

诱导轮出口面和离心轮出口面的压力、速度见表 1。结果显示诱导轮出口和离心轮出口的势扬程系数都较低, 尤其是诱导轮仅 0.133。设计时希望两者的势扬程比例越大越好, 因为动扬程越大则液体流速也越大, 在流体从诱导轮出口的轴向速度转化为进入离心轮后的径向速度的过程中和流体从离心轮出口处很大的动能转变为出口部件势能的过程中的损失都会很大, 导致离心泵水力效率降低。

表 1 压力及速度计算值

Tab. 1 Calculated values of pressure and velocity

	平均总压/Pa	平均静压/Pa	绝对速度/ (m·s ⁻¹)	扬程系数 ρ
诱导轮出口	877081	117239	42.3	0.133
离心轮出口	13350422	6354272	132.2	0.476

诱导轮是决定泵抗汽蚀性能的主要因素, 诱导轮势扬程太低, 则大流量下就会出现离心轮进口处严重汽蚀而导致泵扬程突降的现象 (后续的试验结果也证明了这一点, 见图 9)。计算工况下, 诱导轮出口静扬程仅 0.12 MPa, 而且存在明显的低压区, 因而需要采取措施提高诱导轮势扬程和改善诱导轮出口及离心轮进口流动性。

对于离心轮, 初次设计采用大出口角变曲率叶片的初衷是为了提高泵扬程系数, 但计算结果并不理想 (见表 1), 通过分析离心轮旋转面粒子

轨迹认为,增大叶片出口安放角本身会加重叶片流道的扩散程度,造成能量损失的增加,虽然在流道内易产生涡流和脱流的部位增添短叶片能改善叶片出口处非工作面附近液流的速度分布情况,一定程度上阻止边界层的分离和脱流的产生,但由于泵的扬程要求非常高,离心轮外径相对比较大,变曲率设计长叶片导致整个流道扩散过于严重,增加的短叶片对流体的控制力度不大,而且泵流量又非常小,流道扩散后,摩擦损失、转弯损失、涡流脱落损失等水力损失所占比例较大,抵消了通过增大叶片出口角带来的提高扬程的有效性,因而,需要对离心轮流道参数进行再次综合优化。

4 优化措施及仿真分析

针对第一次设计的带前置诱导轮的超低比转速离心泵内流场仿真计算结果反映出的问题,分别采取了改善诱导轮及离心轮流场的针对性优化措施。

1) 通过调整叶栅汽蚀系数和增加叶尖冲角加大了诱导轮的叶尖直径和螺距,以提高诱导轮的有效扬程。

2) 通过调整计算加大了离心轮进口直径和叶片进口宽度,适当增加叶轮入口冲角和叶轮盖板进口曲率半径来改善诱导轮出口和离心轮入口流动特性,以提高泵的抗汽蚀性能。

3) 将离心轮叶片设计成了出口角 $\beta_2 < 45^\circ$ 的单曲率长短叶片相间的复合结构(如图6)。这样既能改善叶间流道的扩散度又避免了叶轮进口横截面积过于阻塞。

再次优化设计后,采用同样方法对泵内流场进行了模拟计算。计算结果分别如图7、图8和表2所示。可以看到优化效果比较理想,诱导轮出口与离心轮进口连接处不但静压提高很多,扬程系数由0.133提高至0.264,而且压力分布的均匀递增性也得到了明显改善。与图5相比,图8中离心轮旋转面上基本无脱流,流动特性改善明显,而且从表2中可以看出泵静扬程比例系数为0.544,明显高于表1中的0.476。



图6 单曲率叶片复合离心轮

Fig. 6 Composite centrifugal wheel with blade of simplex curvature

表2 压力及速度计算值

Tab. 2 Calculated values of pressure and velocity

	平均总 压/Pa	平均静 压/Pa	绝对速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	扬程系数 ρ
诱导轮 出口	815017	214622	38.3	0.264
离心轮 出口	11401977	6207376	113.9	0.544

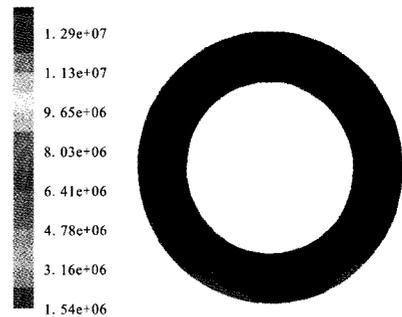


图7 诱导轮与离心轮连接面总压分布

Fig. 7 Total pressure distribution of interface between centrifugal impeller and inducer

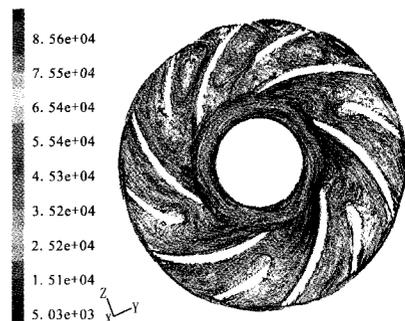


图8 离心轮旋转面粒子轨迹图

Fig. 8 Particle tracking for rotating surface of centrifugal impeller

5 试验验证

为了验证计算分析结果及基于此的优化设计的有效性, 将两次设计的结果均加工成试验件, 分别进行泵水力试验。扬程系数及效率特性比较曲线见图 9、图 10。

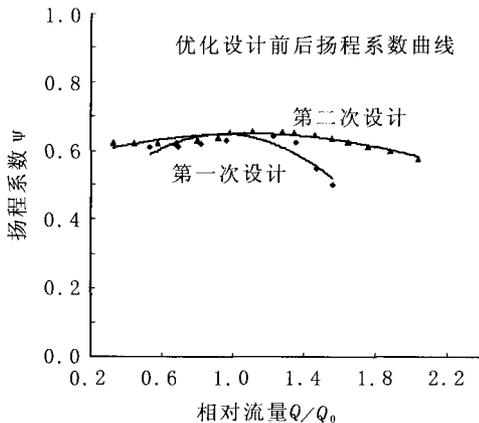


图 9 $\psi-Q$ 水力试验对比曲线

Fig. 9 Contrast curves for high-lift coefficients versus flux

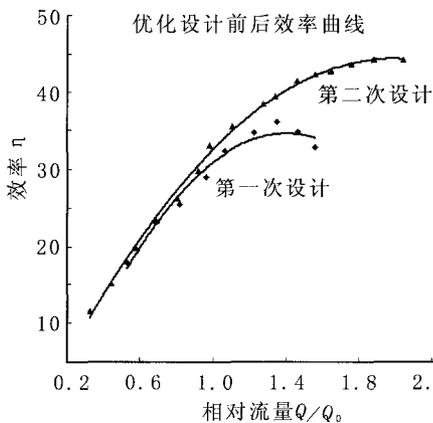


图 10 $\eta-Q$ 水力试验对比曲线

Fig. 10 Contrast curves of efficiency versus flux

从图中可以看出:

1) 与第一次设计的超低比转速泵性能相比, 优化设计后泵扬程系数曲线平稳且高扬程范围宽, 在泵工作流量内, 整个扬程变化极差 0.3 MPa, 与第一次设计的泵大流量下扬程曲线突降情况比较改善显著。

2) 比较效率-流量曲线可知, 优化设计后的超低比转速泵效率比较高, 最高效率达到 44%, 而且各流量点效率均高于第一次设计的泵, 尤其是在大流量区域效率较高。对于比转速 $n_s=22$ 的泵来说, 本泵效率性能在同类泵中达到了较高的水平。

6 结论

运用 FLUENT 流体计算软件及 GAMBIT 前处理软件, 采用三维 $K-\epsilon$ 双模型方程对其内部流场进行模拟仿真, 根据模拟仿真结果, 精确定位需要进行改进设计的结构部位, 然后采取有针对性的合理措施优化设计了一台高扬程、高效率、能在大流量范围稳定工作的液体火箭发动机用超低比转速离心泵。

经过对比试验验证, 证明采用该方法模拟的泵内流动特性比较接近真实流动, 基于内流场分析进行高速超低比转速离心泵优化设计是可行的, 而且是快速高效的。

参考文献:

- [1] 袁寿其. 低比速离心泵理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [2] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [3] 朱祖超. 超低比转速离心泵设计方法 [D]. 杭州: 浙江大学, 1997.
- [4] 郭维, 白东安. 超低比转速离心泵内流场计算及分析[J]. 火箭推进, 2007, 33(2): 26-30.

(编辑: 王建喜)