

# 液体火箭上面级发动机用 超低比转数泵研究

张翠儒, 白东安, 郭 维

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为了研制出液体火箭上面级发动机用高性能超低比转数离心泵, 采用变曲率复合离心轮、加大流量法等设计措施, 设计了比转数分别为 24 和 33 的两种高速小流量高扬程离心泵, 并应用 Fluent 流体计算软件对其内流场进行了分析计算。所设计的泵已参加了相关试验, 试验结果表明泵性能稳定, 扬程曲线无“驼峰”, 功率无过载, 达到了设计目的。

**关键词:** 液体火箭发动机; 超低比转数; 离心泵

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2005)02-0017-06

## Research on ultra-low-specific-speed rotation pump for upper stage engine

Zhang Cuiru, Bai dong' an, Guo Wei

(Shaanxi Power Machine Design and Research Institute, Xi' an 710100, China)

**Abstract:** This paper discussed the design ideas and methods of an ultra-low-specific-speed rotation pump with high performance. The inner-flow field and the outer characteristics of the pump are computed and analyzed. The result shows that the rotation pump can attain better performance by using the design methods with large mass flow. The whole inner flow fields of the rotation pump are computed and analyzed by using the FLUENT software, and the performance characteristics of the pump are also predicted. The hydraulic tests of the rotation pump were carried out, and experiment results indicate that the test data are in agreement with the theoretical prediction. There is no “hump” in the testing head-flow curve. Above all, the design of the high-speed ultra-low-specific-speed rotation pump is successful, it can be referenced for the same kind of pump in the future.

**Key words:** liquid propellant rocket engine; ultra-low-specific-speed; rotation pump

收稿日期: 2004-12-28; 修回日期: 2005-02-20。

作者简介: 张翠儒 (1972—), 女, 工程师, 研究领域为涡轮泵技术。

## 1 引言

液体火箭上面级发动机需要一种推力小、室压高的泵压式发动机。要求涡轮泵具有结构紧凑、尺寸小、扬程高、转速高的特点。

经过充分的论证,最终确定涡轮泵为同轴式涡轮偏置的布局。燃料泵靠近涡轮一侧,氧化剂泵在轴端。涡轮泵转速选为 35000r/min。两泵均为超低比转数泵。

Y/R 泵机组进行了水力试验并参加了相关试车,试验结果表明,两个泵机组工作稳定,满足使用要求。

本文论述了该发动机用泵机组的设计、泵内流场计算、泵试验情况及结构优化情况。

## 2 泵机组设计

### 2.1 发动机要求的泵机组主要性能参数

泵主要性能参数见表 1。

表 1 泵主要性能参数

Tab.1 Main performance parameters of the pump

	氧化剂泵	燃料泵
工作介质	四氧化二氮	偏二甲肼
容积流量/(l/s)	1.0	1.0
扬程/MPa	8.0	8.0
涡轮泵总质量/kg	不大于 10	

比转数是离心泵的重要性能参数,反映泵的性能状态及几何形状。泵的比转数一般用额定工况点的流量、扬程及转速来计算,计算见公式(1)。

$$n_s = \frac{3.65n\sqrt{q}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (1)$$

式中,  $n_s$  为比转数;  $n$  为额定转速, r/min;  $q$  为容积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $H$  为扬程, m。

计算得出两泵比转数分别为 24 和 33,属于超低比转数泵。

### 2.2 超低比转数离心泵设计思路

为提高泵抗汽蚀性能,离心轮前装置了诱导轮。同时针对超低比转数离心泵效率低、小流量

情况不稳定的缺点进行优化设计,保证设计的泵机组满足使用要求。

#### 2.2.1 超低比转数离心泵的特点

与中高比转数离心泵相比,超低比转数离心泵的几何形状及性能曲线有其特殊性。

超低比转数离心泵的几何形状特点如下:

(1) 超低比转数离心泵的流量较小,因而离心轮的叶片出口宽度通常较窄;

(2) 扬程通常很高,所以要求离心轮具有较大的外径;

(3) 离心轮叶片出口宽度小而外径大,故其叶片轴面流道窄而长,摩擦损失较大;

(4) 离心轮内平面流道扩散现象比较严重,离心轮叶片形状常采用圆柱形叶片。

超低比转数离心泵性能曲线的特点如下:

(1) 扬程随流量减小而增加,变化比较缓慢,容易出现“驼峰”现象,而在小流量区出现“驼峰”会造成工作不稳定,表现为运行时出现振动、噪音和压力脉动等;

(2) 泵的关死功率较小,功率随流量增加而上升,而且由于扬程-流量曲线的不稳定性,导致轴功率-流量曲线一般较陡,容易产生过载现象;

(3) 效率曲线比较平坦,高效区较宽,但效率普遍较低。

图 1 是超低比转数离心泵的性能曲线示意图,该图清晰地反映了超低比转数离心泵外特性曲线的上述特点。

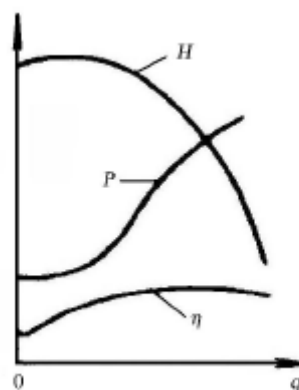


图 1 超低比转数离心泵性能曲线示意图

Fig.1 Sketch map of the ultra-low-specific-speed rotation pump performance

### 2.2.2 超低比转数离心泵叶轮型式选择

离心轮的扬程遵从欧拉方程, 见公式 (2)。

$$H_t = \frac{U_2}{g} (U_2 - C_{m2} \operatorname{ctg} b_2) - \frac{U_1 C_{u1}}{g} \quad (2)$$

式中,  $H_t$  为离心轮理论扬程;  $U_1$  为离心轮进口圆周速度;  $U_2$  离心轮出口圆周速度;  $b_2$  为叶片出口角;  $C_{m2}$  为出口轴面速度;  $C_{u1}$  为进口切向速度。可以看出, 离心轮获得高扬程的途径之一就是采用较大的叶片出口角  $b_2$ , 对超低比转数离心泵来说,  $b_2$  过大会导致叶片流道扩散严重, 引起离心轮流道产生涡流和脱流, 这是因为叶片对流道内液流做功不均匀, 工作面做功能力强于非工作面,

导致靠近叶片出口处非工作面的边界层分离, 液流在边界层附近产生涡流和脱流 (称之尾流), 涡流和脱流区内液流的能量损失造成了离心泵小流量不稳定性。

因而超低比转数离心泵在设计时, 减轻泵流道内涡流和脱流现象是关键所在。从理论上讲, 在流道内易产生涡流和脱流的部位增添短叶片, 会改善叶片出口处非工作面附近液流的速度分布情况, 有效阻止边界层的分离和脱流的产生, 同时可以采用较大的叶片出口角, 提高离心轮的扬程系数, 并且适当的减少进口叶片数, 减少入口排挤, 提高泵机组抗汽蚀性能。

泵叶轮的结构和性能曲线示意图见图 2。

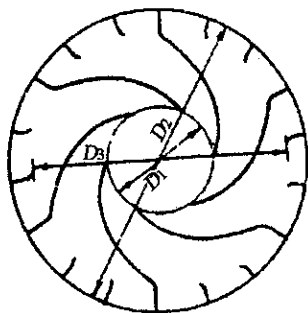
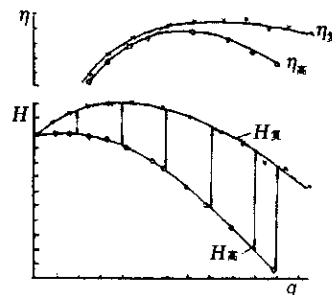


图2 泵叶轮及性能曲线

Fig.2 Curve of the impeller and its performance



## 3 泵机组过流部件结构设计

泵机组过流部件包括诱导轮、离心轮和蜗壳。

### 3.1 诱导轮设计

两泵诱导轮均采用了等螺距平板式诱导轮。氧化剂泵在轴端, 诱导轮设计为圆锥形诱导轮; 燃料泵穿轴, 诱导轮设计为圆柱形诱导轮。

### 3.2 离心轮设计

对超低比转数泵来讲, 应用常规方法设计的离心轮存在效率低、小流量工况下工作不稳定的现象。在设计时采用了加大流量设计法。

加大流量设计法就是通过改变流量和比转数来提高效率。其指导思想就是对给定的设计流量和比转数进行放大, 用放大的流量和比转数来设计一台较大的泵, 由于较大泵的效率线基本上包络了较小泵的效率线 (小流量区相反), 如图 3

所示。这样不但提高了最高效率和设计点效率, 而且还提高了整个使用范围内的平均效率。

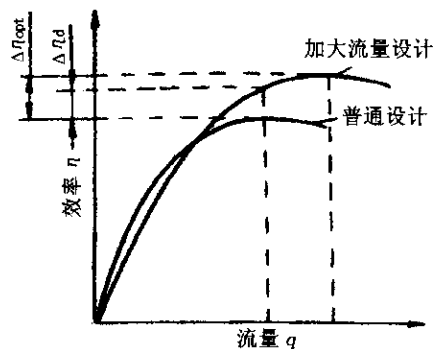


图3 加大流量设计原理图

Fig.3 Principle sketch of increasing the flow rate

具体方法有加大  $b_2$ 、加大叶片出口宽度  $b_2$ 、减小离心轮外径及减小叶片数等。我们在设计时

采用了加大叶片出口角  $b_2$  和叶片宽度  $b_2$  的措施。

### 3.2.1 加大流量法设计参数选择

在采用加大流量法设计离心轮时,除了以下几种参数,其余参数选取均与常规设计法一致。

#### 3.2.1.1 离心轮叶片出口宽度 $b_2$

离心轮叶片出口宽度  $b_2$  是影响泵性能的一个主要参数,因此在加大流量设计法中需慎重选取。超低比转数泵叶轮的轴面流道狭窄,即  $b_2$  很小。

如果按常规方法计算,叶片出口宽度非常小,所以我们采用加大流量设计法中推荐的超低比转数泵经验公式(3)进行计算:

$$k_{b2} = 0.78 \left( \frac{n_s}{100} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中,  $k_{b2}$  为叶片出口宽度计算系数。

#### 3.2.1.2 叶片出口安放角 $b_2$

由于泵叶轮具有较多的出口叶片数,能有效地防止尾流和脱流的产生,并使液流稳定地流动,因此叶片出口安放角  $b_2$  可取较大值以提高扬程系数。但为了避免扬程特性曲线出现驼峰,  $b_2$  不能大于  $90^\circ$ 。

氧化剂泵出口安放角  $b_2$  为  $30^\circ$ , 燃料泵出口安放角  $b_2$  为  $90^\circ$ 。

### 3.2.2 选择叶片数 $Z$

长叶片数应取少一些,这样可减少叶片对液流的入口排挤,降低叶轮的入口动压降,从而提高泵叶轮的汽蚀性能。还可减小摩擦损失,提高效率。此外,根据泵的有限叶片数理论,当叶片数减少后,叶片间流道增大,由于叶轮间轴向旋涡的影响,叶轮出口处滑移增大,随着流量的增加扬程急剧下降,故可减小或消除驼峰。

氧化剂泵叶片数为 6 长 6 短,燃料泵叶片数为 6 长 12 短。

### 3.2.3 叶轮出口直径计算

叶轮出口直径  $D_2$  按公式(4)计算

$$D_2 = \frac{60}{\pi n} \sqrt{\frac{gH^L}{y}} \quad (4)$$

式中,  $H^L$  为离心轮实际扬程,  $y$  为扬程系数。超低比转数的扬程系数为  $y = 0.55 \sim 0.65$ , 然后用公式(5)对初算的叶轮出口直径  $D_2$  进行校核。

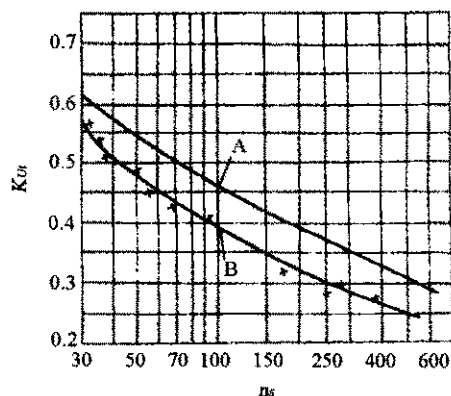
$$D_2'' = \frac{60}{\pi n} \left[ \frac{C_{m2}}{2 \tan b_2} + \sqrt{\left( \frac{C_{m2}}{2 \tan b_2} \right)^2 + gH_{T\infty} + u_1 C_{u1}} \right] \quad (5)$$

式中,  $H_{T\infty}$  为无限叶片数离心轮理论扬程。如果校核值和计算值误差很小,说明两泵的扬程系数选择是合理的。两泵叶轮出口直径就取计算结果的园整值。

### 3.3 蜗壳设计

对超低比转数高速泵而言,蜗壳里的液流速度很高,流动基本处于阻力平方区的湍流状态,蜗壳流道的表面粗糙度对液流的水力损失的影响很大,要求蜗道内光滑。因此采用铣加工后可以打磨的矩形断面。

对超低比转数泵而言,蜗壳内的水力损失仅次于圆盘摩擦损失,对泵的性能具有举足轻重的作用。在选取蜗壳喉部速度系数  $K_{u1}$  时,参考了超低比转数泵面积比设计法提供的喉部速度系数图(图4),让蜗壳的喉部面积可以和离心轮合理匹配,减少水力损失。



A—原推荐曲线; B—统计曲线

图4 蜗壳喉部速度系数

Fig.4 Diagram of the laryngeal speed coefficient of the pump

## 4 泵机组内流场的计算及分析

完成设计工作后,利用 FLUENT 流体计算软件,对诱导轮、离心轮等(蜗壳及扩散管流道)内的压力和速度分布进行了分析。

### 4.1 诱导轮压力及速度分析

两诱导轮进口面上的总压分布均匀而且明显比出口面上的总压低,出口面总压分布呈由轮毂向轮缘逐渐递增的规律,诱导轮进口总压低,出口总压高,这与诱导轮能增加流体扬程的功能相符合。

诱导轮工作表面没有发现脱流或涡流流动,而背面的总压分布不很均匀,叶片外边缘处压力较高,从而也导致其相应位置的绝对速度分布不均,有少量涡流现象。

### 4.2 离心轮压力及速度分析

离心轮叶片表面的总压分布从进口到出口逐渐增加,而且分布比较均匀。另外同一半径面上长叶片工作面总压明显高于背面总压,因此叶片背面附近的液体有脱流现象。

离心轮流道面上的相对速度分布总体上比较令人满意,但还是有涡流及脱流现象存在。蜗壳隔舌附近的长叶片工作面及背面周围有涡流。

短叶片背面和工作面上流体的速度在大小上差异不大,方向均和长叶片表面流体一致。叶片工作面上速度分布很均匀,很有规律,而背面少部分流体的速度方向发生了变化,这说明短叶片的背面上出现了少量的涡流现象。

## 5 泵机组效率计算

在整个设计完成后,应用损失极值法对泵机组的效率进行计算。

### 5.1 水力损失和容积损失

超低比转数泵机组的水力损失和容积损失都可以按常规的计算方法进行。

### 5.2 机械损失

#### 5.2.1 叶轮圆盘摩擦损失功率

叶轮圆盘摩擦损失功率是由于旋转叶轮的前后盖板外侧与泵腔内水体存在相对运动而引起的机械损失。

圆盘摩擦损失正比于叶轮外径的五次方,叶

轮外径的微小增长都会引起圆盘摩擦损失的迅速上升。超低比转数高速离心泵为了产生较高的扬程,叶轮外径总是比较大的,这是造成低比转数高速离心泵效率很低的主要原因之一。

这点在燃料泵上尤其突出,燃料泵圆盘摩擦损失占泵总功率的40%。

#### 5.2.2 轴承、密封损失功率

对于常规的泵机组,轴承、密封损失的功率所占比例不大,一般为总功率的1~3%,但对超低比转数泵机组来说,泵机组总功率很小,轴承和密封又借用了现有型号(泵机组功率约为该型号的4倍)使用产品,这样轴承、密封损失的功率就很大了。该型号泵机组轴承和密封损失约占总功率的20%。

## 6 泵机组水力试验情况

由于带诱导轮的超低比转数高速离心泵内部流动非常复杂,泵内各过流部件之间也相互影响,因此数值模拟与泵内的真实流动情况不能完全一致,为了获得泵的真实性能,要求对泵进行相关试验来验证泵机组结构设计是否满足使用要求。

在转速30000r/min情况下进行水力试验,然后转换为额定转速下介质的性能数据,性能曲线见图5、6。从图中可以看出,扬程—流量曲线比较平坦,无“驼峰”现象,两泵扬程均达到了设计要求;轴功率随流量变化趋势比较平坦,没有过载现象;泵效率满足要求,最高效率向右偏离设计工况点。

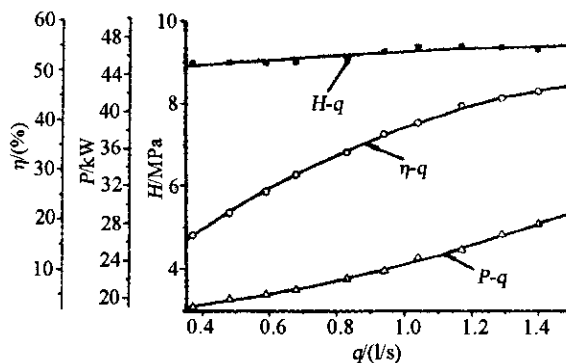


图5 氧化剂泵性能曲线

Fig.5 Curve of the oxidizer pump performance

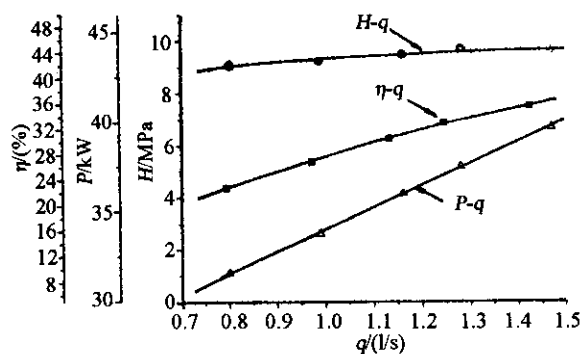


图 6 燃料泵性能曲线

Fig.6 Curve of the fuel pump performance

## 7 结论

所设计的泵结构紧凑、体积小、质量轻。扬程和效率达到了较高的水平。

通过一系列的优化设计,克服了小流量超低比转数泵的工作不稳定性,减轻了扬程一流量的驼峰现象,消除了轴功率过载现象,取得了良好的效果。

运用流体计算软件 FLUENT 及其前处理软件 GAMBIT 对从诱导轮进口到蜗壳出口整个离心泵内部流场的流动特性进行了模拟计算,泵内诱导

轮、离心轮和蜗壳等的内部速度、静压和总压分布理想,流动特性较好。

泵机组已参加了相关试验,从试验结果看,泵性能稳定,参数协调,满足使用要求。

## 参考文献:

- [1] 张兴波等译,液体火箭发动机工作过程的数学模拟[M],中国航天科技集团公司第十一研究所,1998.
- [2] 袁寿其,低比转速离心泵理论与设计[M],机械工业出版社,2001.
- [3] 关醒凡,泵的理论设计与[M],机械工业出版社,1987.
- [4] 张远君,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.
- [5] 朱宁昌等译,液体火箭发动机现代工程设计[M],中国宇航出版社,2004.
- [6] 张蓉生,低比速叶轮优化设计模型[J],流体工程,1991,19(8).
- [7] 汪建华,低比转数离心泵叶轮的优化设计[J],水泵技术,1993,(6).

(编辑:侯 早)