

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.020

具有诱导轮的高速离心泵汽蚀特性试验*

崔宝玲¹ 万忠¹ 朱祖超^{1,2} 郑齐奎³

(1. 浙江理工大学流体输送技术实验室, 杭州 310018; 2. 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 杭州 310027;
3. 浙江天德泵业有限公司, 苍南 325800)

【摘要】 采用闭式流体输送试验台,对具有前置诱导轮的高速离心泵进行了汽蚀特性试验研究,比较分析了无诱导轮、单个及串联诱导轮3种工况下诱导轮对离心泵性能及汽蚀性能的影响。发现前置单个或串联诱导轮对离心泵的性能影响并不显著,单个诱导轮的离心泵性能相对于无诱导轮的离心泵性能稍有下降,具有串联诱导轮的离心泵扬程和效率与无诱导轮离心泵相比稍有增加;但采用串联诱导轮可有效提高离心泵的汽蚀性能。

关键词: 离心泵 高速 诱导轮 汽蚀特性 试验

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0096-04

Research on Suction Performance of High-speed Centrifugal Pump with Inducer

Cui Baoling¹ Wan Zhong¹ Zhu Zuchao^{1,2} Zheng Qiluan³

(1. Laboratory of Fluid Transmission Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China
2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
3. Zhejiang Tiande Pumps Co., Ltd., Cangnan 325800, China)

Abstract

Experimental research on suction performance was carried out on high-speed centrifugal pump with inducer by using closed test. The effect on the characteristic and suction performance of the centrifugal pump was analyzed with no inducer, one and two-phase inducers. It was found that one or two-phase inducers had little influence on the characteristic performance of a centrifugal pump. Compared with no inducer, the head and efficiency decreased slightly by using one inducer, and they slightly increased by using a two-phase inducer. But suction performance of centrifugal pump was improved by using a two-phase inducer.

Key words Centrifugal pump, High speed, Inducer, Suction performance, Experiment

引言

高速离心泵由于具有单级扬程高、结构紧凑、维护方便等优点,已广泛应用到石油、化工、制药、冶金及航空航天等工业领域,用于输送小流量高扬程介质。随着航天技术和石化工业的进一步发展,离心泵已逐步向高速和大功率方向发展;随着离心泵输送介质的多样化,特别是离心泵在易汽化介质和气

体低温液化输送等应用领域的不断拓展,对离心泵汽蚀性能、工作稳定性等提出了更高的要求^[1]。

诱导轮技术是提高离心泵汽蚀性能的有效途径之一^[2]。诱导轮之所以能够改善泵的汽蚀性能主要是诱导轮自身具有较好的汽蚀性能及诱导轮产生的扬程减少泵的汽蚀余量。诱导轮是一个叶片负荷(升压)很小的类似轴流式的叶轮,其本身的设计使它又比普通的轴流式叶轮具有更好的汽蚀性能。诱

收稿日期:2009-04-07 修回日期:2009-06-09

* 国家自然科学基金资助项目(20706049、50879080)、国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724300)和浙江省重大科技攻关计划资助项目(2008C01024-1)

作者简介:崔宝玲,副教授,主要从事流体机械的汽蚀特性与数值模拟研究, E-mail: blcui@zstu.edu.cn

导轮最大的降压点发生在离叶片入口较远、流体压力已较高的叶片外缘区域,因此它比离心轮、一般的轴流轮具有更高的汽蚀性能,而且离心力作用小,不会产生液体和气泡的两相分离。即使诱导轮中发生汽蚀,泵的性能曲线也下降缓慢,所以诱导轮在离心泵中得到广泛的应用^[3-4]。采用诱导轮设计的离心泵的汽蚀比转数能够达到4 000~5 000。

虽然在离心泵主叶轮前增加前置诱导轮在一定程度上满足了工业领域对泵抗汽蚀性能的要求,但是若要取得更高的汽蚀比转数,仅靠设计单个诱导轮是不够的,采用串联诱导轮结构可使高速离心泵获得优越的汽蚀性能。随着计算机技术及CFD技术的发展,目前国内外针对诱导轮已进行了一些数值模拟研究^[5-6],但对高速诱导轮离心泵的试验研究很少^[7-9]。因此,本文针对无诱导轮、单个诱导轮及串联诱导轮3种工况进行试验研究。

1 理论基础

在叶轮前设置诱导轮,可以使离心叶轮前存在较大的旋转速度分量,从而使离心叶轮进口前的相对速度降低,即降低了离心轮进口动压降 $NPSHR$,同时诱导轮产生了一定的压头,增加了离心叶轮进口的能量,因此也就提高了离心叶轮的汽蚀性能。

虽然诱导轮能够在产生一定程度的汽蚀状态下工作,但在设计时还应保证诱导轮的汽蚀余量 $NPSH_i$ 小于装置汽蚀余量 $NPSHA$,或者保证诱导轮的汽蚀比转数 C_{kpi} 大于装置给定的汽蚀比转数 C_{kpa} ,即^[2]

$$\begin{aligned} NPSH_i &\leq 0.75NPSHA \\ C_{kpi} &\geq 1.36C_{kpa} \end{aligned} \quad (1)$$

$$H_{ind} \geq NPSHR - NPSH_i + 0.08 \frac{U_{i2p}^2}{2g} \quad (2)$$

式中 U_{i2p} ——计算直径处的圆周速度

H_{ind} ——诱导轮实际扬程

在串联诱导轮中(图1),第1级诱导轮设计的目的是尽可能降低汽蚀余量 $NPSH_1$,满足装置给定的汽蚀余量 $NPSHA$ 的要求,从而保证所设计的高速离心泵具有较高的汽蚀性能。第2级诱导轮设计的关键是要保证其出口扬程能够满足离心叶轮进口的能量要求,保证离心叶轮的汽蚀断裂破坏发生在两个诱导轮的汽蚀破坏之后,这样高速泵的汽蚀性能就取决于第1级诱导轮^[2]。

而且只要第2级诱导轮产生的汽蚀气泡能够溃灭在第2级诱导轮出口之前的外缘区域,不会进入离心叶轮,这样即使第2级诱导轮在一定的汽蚀状态下工作,也影响不到离心叶轮的汽蚀性能,即高速

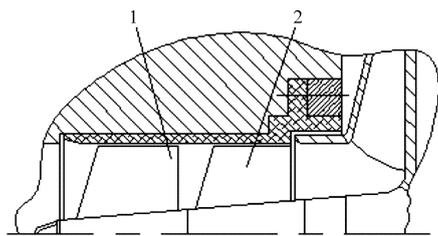


图1 诱导轮和离心轮的匹配结构示意图

Fig. 1 Sketch map of inducer and centrifugal impeller matching

1. 第1级诱导轮 2. 第2级诱导轮

泵的汽蚀性能仍取决于诱导轮。不过设计时仍应保证第1级诱导轮产生的出口扬程满足第2级诱导轮进口的能量要求,即

$$H_1 + NPSH_1 - NPSH_2 \geq 0 \quad (3)$$

$$H_1 + H_2 \geq NPSHR - NPSH_2 + 0.08 \frac{U_{i2p}^2}{2g} \quad (4)$$

式中的 H_1 和 $NPSH_2$ 分别是第1级诱导轮产生的实际扬程和第2级诱导轮的汽蚀余量; H_2 、 $NPSH_2$ 、 U_{i2p} 和 $NPSHR$ 分别为第2级诱导轮的出口扬程、汽蚀余量、出口计算直径处的圆周速度和离心叶轮进口的汽蚀余量。

其中诱导轮实际扬程 H_{ind} 的经验计算公式为^[2]

$$H_{ind} = An^2 - BnQ - kQ^2 \quad (5)$$

其中

$$A = 1.82 \times 10^{-4} D_p^2$$

$$B = 6.8 \times 10^{-3} D_p^2 / (F_m S)$$

$$k = 0.554 D_p^2 / (F_m^2 S^2)$$

$$F_m = 0.785 D_i^2 (1 - R_{d2}^2) (1 - z_i \delta_m / S)$$

$$S = \pi D_i \tan \beta_i$$

式中, F_m 、 D_p 、 S 、 n 、 Q 、 R_{d2} 、 z_i 、 δ_m 、 β_i 和 D_i 分别为诱导轮的轴面流道面积、计算直径、导程、转速、流量、出口轮毂比、叶片数、叶片平均厚度、叶片安装角和叶尖直径。

2 试验研究

2.1 诱导轮的几何参数

进行汽蚀特性研究的具有前置诱导轮的低比转数高速离心泵设计点的流量为 $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 270 \text{ m}$,转速 $n = 8500 \text{ r/min}$ 。为了取得更好的汽蚀性能,在叶轮前设计了一个2叶片诱导轮及一个2叶片(第1级)和4叶片(第2级)串联的诱导轮。表1为诱导轮的主要几何参数。图2和图3分别为单个及串联诱导轮的结构示意图。

2.2 试验装置

试验所用流体输送试验台符合国家规定的B级泵测试试验台技术要求,流体输送试验台装置示意图如图4所示。试验台属于闭式系统。液流由汽

表1 诱导轮的主要几何参数

Tab.1 Main geometrical parameters of inducer

参数	单个	第1级	第2级
叶片数 z	2	2	4
进口流量系数 Φ_{ind}	0.072	0.068	0.081
叶尖直径 D_t/mm	49.8	49.5	49.5
叶片安装角 $\beta_i/(\circ)$	9.5	8.5	14.0
进口轮毂比 R_{d1}	0.315	0.2	0.436
出口轮毂比 R_{d2}	0.55	0.376	0.593
叶栅稠度 τ	2.2	2.7	2.0
叶片前缘包角 $\theta_1/(\circ)$	120	120	120
叶尖包角 $\theta_2/(\circ)$	390.57	480.7	175
轴向长度 L/mm	36.87	38.78	31.73
导程 S/mm	26	23.24	38.77

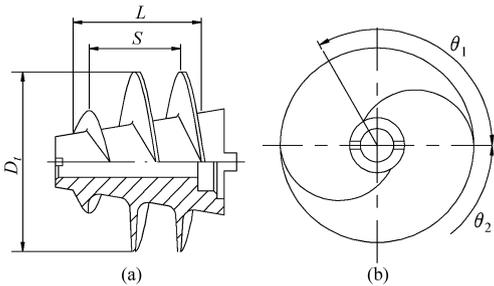


图2 单个诱导轮的结构示意图

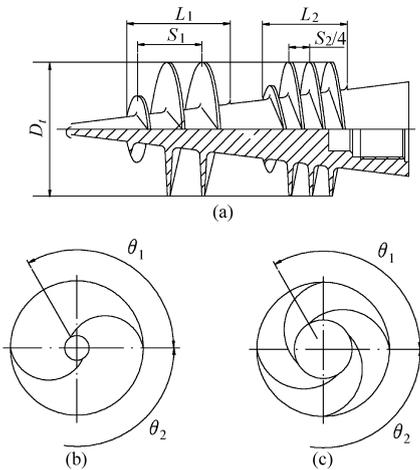
Fig.2 Structural sketch map of single inducer
(a) 叶片形状 (b) 进口边形状

图3 串联诱导轮结构示意图

Fig.3 Structural sketch map of two-phase inducer
(a) 叶片形状 (b) 2叶片诱导轮进口形状
(c) 4叶片诱导轮进口形状

蚀筒1中流出,经过管路和闸阀7及软管8后到达试验泵11进口,然后经过诱导轮、叶轮从出口排出,经管路、稳流筒(图中未画出此稳流筒)流量测量计18、19,再进入稳流筒20,最后又流回到汽蚀筒中。泵进口和出口处的压力测量采用的是KF1851型电容式差压变送器;流量测量采用的是IFM4080F系

列的电磁流量器。扭矩转速传感器采用JC型扭矩转速传感器及与其配套使用的JW型扭矩仪。

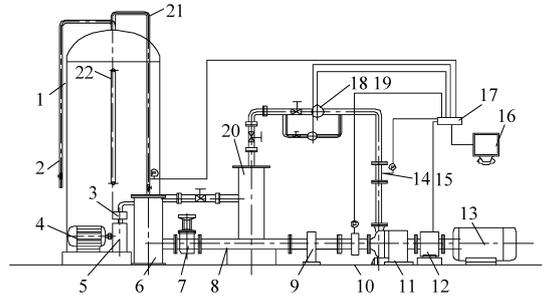


图4 流体输送试验装置示意图

Fig.4 Sketch map of fluid transport test equipment

1. 汽蚀筒 2. 排气管 3. 油气分离器 4、13. 电动机 5. 真空泵 6. 气水分离器 7. 闸阀 8. 软管 9. 活动支架 10. 固定板 11. 试验泵 12. 扭矩仪 14. 压力表 15. 传感器 16. 计算机 17. 数据采集卡 18. 流量计 19. 流量传感器 20. 稳流筒 21. 排气管 22. 液位计

2.3 试验结果分析

图5所示为无诱导轮、单个及串联诱导轮离心泵的性能试验结果。在图中,曲线1(H_1 和 η_1)、曲线2(H_2 和 η_2)和曲线3(H_3 和 η_3)分别为无诱导轮、单个和串联诱导轮的离心泵试验的性能曲线。

从图中可以看出,无诱导轮及有诱导轮高速离心泵的性能曲线都存在驼峰,小流量都不稳定,加入诱导轮的离心泵在小流量时,对驼峰稍微有一点改善。这可能是因为诱导轮出口的速度预旋可以改善叶轮进口回流。但是随着流量的增加,加入诱导轮的泵扬程下降比没有诱导轮的泵稍微快一些。从图中也可以看出,加入单个诱导轮后,离心泵的性能相对于无诱导轮时有所下降;加入串联诱导轮,离心泵的扬程和效率稍微提高。在流量 $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ 、转速 $n = 8500 \text{ r}/\text{min}$ 时,扬程 $H_1 = 276.1 \text{ m}$,效率 $\eta_1 = 32.68\%$;扬程 $H_2 = 268.65 \text{ m}$,效率 $\eta_2 = 31.47\%$;扬程 $H_3 = 280.53 \text{ m}$, $\eta_3 = 33.61\%$ 。

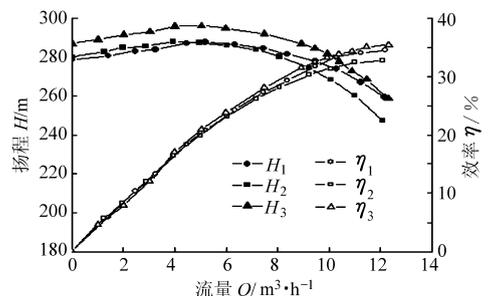


图5 诱导轮离心泵的性能曲线

Fig.5 Characteristic curves of centrifugal pump with inducer

图6所示为无诱导轮时离心泵汽蚀试验曲线 $NPSH_1$ 、单个和串联诱导轮离心泵汽蚀试验曲线

$NPSH_2$ 和 $NPSH_3$ 。在设计点流量 $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, $NPSH_1 = 3.4 \text{ m}$, $NPSH_2 = 2.6 \text{ m}$, $NPSH_3 = 1.58 \text{ m}$ 。从图中可以看出,加入单个等螺距诱导轮后,泵的汽蚀性能稍有提高,但是效果并不很理想。加入串联诱导轮后,离心泵的汽蚀性能明显改善。这是因为诱导轮将轴向速度逐渐转化为径向速度,从而起到预旋作用,使叶轮进口处流体流动方向变得稳定、流速变得均匀,并且能够对进口液流进行预增压,从而改善离心叶轮的进口条件,增强了离心叶轮的抗汽

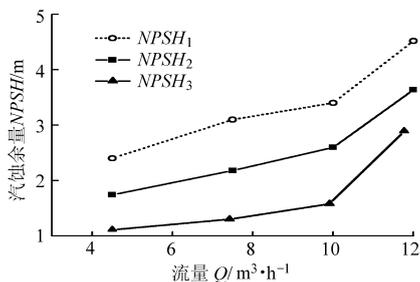


图6 诱导轮离心泵的汽蚀性能曲线

Fig. 6 Cavitation curves of centrifugal pump with inducer

蚀性。

从上述分析可以看出,单个等螺距诱导轮不能同时满足产生高扬程和高汽蚀性能的要求。要使等螺距诱导轮的汽蚀性能高,进口部分的叶片承受的负荷则要小,这就很难满足离心泵进口所需要的压头。反之,如要使诱导轮产生高压头,进口部分的叶片必然要承受较大的负荷,这会导致汽蚀性能恶化。从试验的结果可以看出,采用串联诱导轮可以解决上述的问题。

3 结论

(1) 前置单个或串联诱导轮对离心泵的性能影响并不大,单个诱导轮的离心泵性能相对于无诱导轮的离心泵性能稍有下降,具有串联诱导轮的离心泵扬程和效率与无诱导轮离心泵相比稍有增加。

(2) 前置单个等螺距诱导轮后,泵的汽蚀性能稍有提高,但是效果并不是很理想。前置串联诱导轮后,离心泵的汽蚀性能明显改善。

参 考 文 献

- Cui Baoling, Zhu Zuchao, Zhang Jianci, et al. Improving suction performance of centrifugal pump by using jetting device[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2004, 12(5): 628 ~ 632.
- 朱祖超. 低比转速高速离心泵的理论及设计应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- 孔繁余, 黄建军, 吕毅, 等. 离心泵变螺距诱导轮的开发[J]. 排灌机械, 2008, 26(3): 10 ~ 14.
Kong Fanyu, Huang Jianjun, Lü Yi, et al. Development of variable-pitch inducers in centrifugal pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(3): 10 ~ 14. (in Chinese)
- 朱祖超, 王乐勤, 江希莹. 高速泵变螺距诱导轮的设计分析[J]. 农业机械学报, 1997, 28(4): 102 ~ 106.
Zhu Zuchao, Wang Leqin, Wang Xixuan. Analysis and design on variable-pitch inducers of high-speed centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28(4): 102 ~ 106. (in Chinese)
- 孔繁余, 吕毅, 黄建军, 等. 变螺距诱导轮流场的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 45 ~ 48.
Kong Fanyu, Lü Yi, Huang Jianjun, et al. Numerical simulation on flow field of variable-pitch inducers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 45 ~ 48. (in Chinese)
- Delgosha O C, Reboud J L, Patella R F. Numerical study of the effect of the leading edge shape on cavitation around inducer blade sections[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on cavitation, Pasadena, USA, 2001.
- Bakir F, Kouidri S, Noguera R, et al. Experimental analysis of an axial inducer influence of the shape of the blade leading edge on the performance in cavitating regime[J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(12): 293 ~ 301.
- 王集村. 双级整体诱导轮的试验研究[J]. 水泵技术, 1988(1): 7 ~ 14.
- 朱祖超. 提高高速泵汽蚀性能的理论分析与实验研究[J]. 机械工程学报, 1999, 35(6): 85 ~ 88.
Zhu Zuchao. Theoretical analysis and engineering implementation on achieving excellent suction performance of high-speed centrifugal pumps[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(6): 85 ~ 88. (in Chinese)