

低汽蚀余量高速泵诱导轮研究

侯 杰, 于海力, 杨 敏

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 诱导轮是用来改善高速泵汽蚀性能的重要部件。为了研究诱导轮设计参数对高速泵汽蚀性能的影响, 对一台卧式高速泵的诱导轮分别进行了 3 种方案的设计, 并且对安装了每一种设计方案诱导轮的卧式高速泵都在试验室进行了相应的汽蚀试验, 试验结果显示通过合理设计诱导轮参数可以显著提高高速泵的汽蚀性能。为了进一步研究诱导轮内部液体的流动状态, 采用雷诺时均方法, 对诱导轮内部的流场进行数值模拟, 研究了诱导轮叶片工作面上相对速度分布及压力分布情况。依据数值模拟和试验结果, 提出了对于本结构的高速泵诱导轮设计时诱导轮的扬程系数应小于 0.15, 进口液流冲角要在合理范围内选取, 不能取值过小。在合理的设计条件下, 高速泵配备相等螺距诱导轮可以达到优良的汽蚀性能。

关键词: 诱导轮; 汽蚀性能; 高速泵; 进口液流冲角; 扬程系数

中图分类号: V434.21-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 06-0019-05

Study of inducers for low-NPSHr high-speed pumps

HOU Jie, YU Hai-li, YANG Min

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: The inducer is an important part to improve cavitation performance of high-speed pump. In order to research the effect of the design parameters of the inducer on cavitation performance of high-speed pumps, three design schemes of inducer for a horizontal high-speed pump were made respectively, and then a corresponding cavitation experiment was performed in laboratory for the horizontal high-speed pump with each designed inducer. The experimental results shows that cavitation performance of the high-speed pump can be remarkably improved if the parameters of the inducer are reasonably designed. In order to research the liquid flow state in the inducer, the method of RANS was adopted to simulate internal flow field in the inducer numerically to determine the relative velocity distribution and pressure distribution on the working face of inducer. Results of experimental research and numerical calculations prove that the head coefficient of this kind of inducer should be less than 0.15 and fluid inlet angle of attack should be reasonably adjusted. The high-speed pump with equal pitch inducer and rational design can obtain excellent cavitation

收稿日期: 2014-05-20; 修回日期: 2014-07-12

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2011JY01)

作者简介: 侯杰 (1981—), 男, 工程师, 研究领域为高速泵和耐磨泵设计

performance.

Keywords: inducer; cavitation performance; high-speed pump; fluid inlet angle of attack; head coefficient

0 引言

本文研究的高速泵为部分流泵,是一种小流量高扬程泵。与普通离心泵结构不同,这种高速泵一般采用开式叶轮,叶片为放射直叶片。由于配备增速箱,目前高速泵的转数可达 30 000 r/min,扬程可达 2 000 m 以上。

在高速泵设计中,可以通过提高装置汽蚀余量,减少进口管路损失,合理设计叶轮结构以及提高叶轮入口前过流表面的精度和光洁度等方法改善高速泵的汽蚀性能。但目前来说,通过给高速泵配备合适的诱导轮来改善汽蚀性能是最有效、最可靠的方法。配备诱导轮后,可以大幅提高离心泵的汽蚀性能,特别是对于高速泵,汽蚀比转数可以达到 3 000~5 000。目前,对于离心泵诱导轮的研究主要集中在诱导轮的汽蚀性能^[1],诱导轮的参数设计^[2-4],诱导轮和叶轮的匹配关系研究^[5]以及诱导轮流场 CFD 模拟^[6-9]等方面。本文以一台卧式高速泵为例,重点研究了高速泵配备诱导轮时,诱导轮进口液流冲角取值和诱导轮扬程系数选取 2 个方面对高速泵汽蚀性能的影响,并在试验室进行了试验验证,同时对诱导轮流场进行数值模拟,深入了解诱导轮内部液体的流动状态。

1 诱导轮设计方案对比

本文研究的卧式高速离心泵,额定流量 162 m³/h,扬程 486 m,转数 8 810 r/min。泵过流部分基本结构如图 1 所示,其中叶轮采用直叶片,7 根长叶片和 14 根短叶片均布排列,并且叶轮为半开式结构。

设计要求额定流量下的必需汽蚀余量达到 6 m,相应的汽蚀比转数为 2 740。在无诱导轮的情况下,该类型高速泵汽蚀比转数通常可以达到

900,由于该高速泵对汽蚀性能要求高,所以必须配备合适的诱导轮才可能满足汽蚀要求。

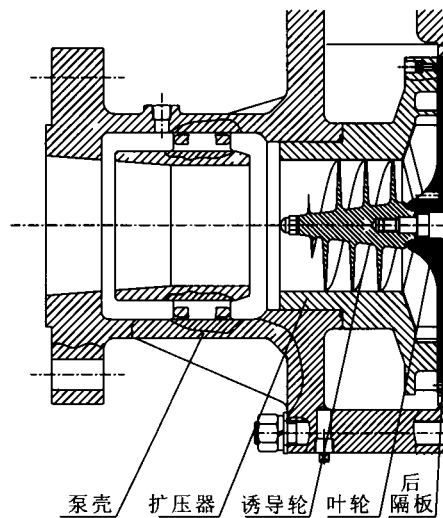


图 1 泵过流部分结构图

Fig. 1 Structure diagram of the section of pump that liquid passes through

诱导轮既要求本身具有良好的汽蚀性能,保证诱导轮不发生汽蚀,同时要保证其产生足够的扬程以满足离心轮进口的能量要求并使高速离心泵能够无汽蚀的运行。

诱导轮的入口流量系数 Φ_{ind} 是决定诱导轮汽蚀性能的重要指标,它与诱导轮进口液流角 β 的关系如下所示:

$$\Phi_{ind} = \tan \beta \quad (1)$$

诱导轮扬程可以依照文献 [1] 中给出了经验公式计算:

$$H_{ind} = A_n^2 - B_n Q - k Q^2 \quad (2)$$

其中

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

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

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

式中: A_m 为诱导轮的轴面流道面积, mm²; S 为诱

导轮的导程, mm; D_p 为诱导轮的计算直径, mm。

诱导轮的扬程系数可以通过下边公式计算:

$$\Psi=H_{ind}/(U^2/g)$$
 (3)

式中 U 为诱导轮叶尖速度, m/s。

方案一选取 4 叶片变螺距诱导轮, 参数如表 1 所示。

表 1 方案一诱导轮参数
Tab. 1 Parameters of inducer in Scheme One

名 称	参 数
诱导轮外径/mm	112
叶片进口角/(°)	11
叶片出口角/(°)	25
进口液流冲角/(°)	5.8
入口流量系数	0.091
扬程系数	0.296

配备该诱导轮后, 在试验室对高速泵做了汽蚀性能试验。试验台主要由储水池、增压泵、进水稳压箱、真空泵、压缩机和液位变送器等组成, 试验系统既能满足泵性能试验和汽蚀试验对测量精度要求, 又保证散热条件好, 试验效率高。

试验采用常温清水, 按国家标准当扬程下降 3% 时, 装置汽蚀余量值即为泵在该流量点下的必需汽蚀余量。试验结果显示设计流量 162 m³/h 时, 该泵的必需汽蚀余量为 7.4 m, 汽蚀比转数为 2 341, 未达到规定设计要求。为了进一步改善该泵的汽蚀性能, 需要重新设计更加匹配的诱导轮。

对于诱导轮入口流量系数, 文献 [3] 研究认为入口流量系数取值范围一般为 0.06~0.15, 文献 [4] 研究提出诱导轮入口流量系数不是一成不变的, 随着转数的提升, 入口流量系数取值要降低, 一般转数大于 5 000 r/min, 流量系数取 0.064~0.1。对比已有的研究结果, 方案一诱导轮入口流量系数在合理范围内。

对于诱导轮进口液流冲角, 文献 [2] 提进口液流冲角可取 3°~8°, 冲角对进口液流角的比值在薄叶片时取低值 0.35, 厚叶片时取高值 0.50, 平均值 0.425 已被优先采用。文献 [3] 研究认为变螺距诱导轮的进口液流冲角可以取 0 或较小

值。方案一设计为变螺距诱导轮, 设计工况下进口液流冲角为 5.8°, 有可能取值过大, 影响泵的汽蚀性能。

诱导轮需要产生足够的扬程, 但是诱导轮设计时的扬程系数具有一定限制。文献 [2] 提到诱导轮的扬程系数取值范围应在 0.06~0.15。文献 [5] 指出对于安装诱导轮的离心泵, 并非诱导轮的出口角越大, 扬程越高, 泵的汽蚀效果就越好。诱导轮扬程系数过高, 总的汽蚀效果可能更差。方案一中诱导轮的扬程系数为 0.296, 该值高于文献 [2] 中提到的诱导轮扬程系数的合理范围。

考虑到诱导轮进口液流冲角取值和诱导轮扬程系数选取 2 个方面, 我们分别提出 2 种新的方案重新设计诱导轮。

方案二减小叶片进口角, 从而减小诱导轮进口液流冲角。设计的 3 叶片变螺距诱导轮主要参数如表 2 所示。

表 2 方案二诱导轮参数
Tab. 2 Parameters of inducer in Scheme Two

名 称	参 数
诱导轮外径/mm	112
叶片进口角/(°)	8
叶片出口角/(°)	25
进口液流冲角/(°)	2.86
入口流量系数	0.091
扬程系数	0.296

方案三减小诱导轮的扬程系数, 采用 3 叶片等螺距诱导轮。设计主要参数如表 3 所示。

表 3 方案三诱导轮参数
Tab. 3 Parameters of inducer in Scheme Three

名 称	参 数
诱导轮外径/mm	112
叶片进口角/(°)	10.6
叶片出口角/(°)	10.6
进口液流冲角/(°)	5.4
入口流量系数	0.091
扬程系数	0.138

分别对安装了两种新设计诱导轮的卧式高速泵进行汽蚀性能试验,结果显示安装了方案二的诱导轮,在设计流量 162 m³/h 时,泵的必需汽蚀余量为 12.3 m,相应的汽蚀比转数为 1 599。而安装了方案三的诱导轮,在设计流量 162 m³/h 时,泵的必需汽蚀余量为 4.36 m,相应的汽蚀比转数为 3 459。

由试验结果可见,对于本文研究的卧式高速泵结构形式,诱导轮的进口液流冲角并不是越小越好,进口液流冲角偏小会严重破坏泵的汽蚀性

能,使泵的必需汽蚀余量大大提高。同时,泵的汽蚀性能并非随诱导轮的出口角增大,诱导轮扬程变高而提高。调整诱导轮的扬程系数在合理范围内,使诱导轮和叶轮合理匹配,泵才能达到最优的汽蚀效果。

对安装方案三诱导轮的高速泵做了各个工况下的汽蚀性能试验,试验结果如表 4 所示,结果显示该诱导轮不仅在额定工况下汽蚀性能良好,在整个使用工况下汽蚀性能都很优越,完全可以满足设计要求。

表 4 采用方案三诱导轮的高速泵汽蚀性能试验结果

Tab. 4 Experimental results for cavitation performance of high-speed pump with inducer in Scheme Three				
流量/(m ³ ·h ⁻¹)	NPSHr	进口液流冲角/(°)	入口流量系数	汽蚀比转数
50	2.84	9	0.028	2 667
70	3.24	8.37	0.039	2 859
90	3.54	7.68	0.051	3 033
110	3.47	7.05	0.062	3 403
135	3.82	6.25	0.076	3 509
162	4.36	5.46	0.090	3 459
178	5.58	4.89	0.1	3 032

2 数值模拟分析

为了进一步研究诱导轮内液体的流动状态,对方案一和方案三中的诱导轮,分别建立三维模型并进行相应的流场计算。

采用雷诺时均方法 (RANS),对诱导轮的流场进行数值模拟。采用对复杂边界适应性强的非结构化四面体网格对计算域进行网格划分,并对诱导轮与外套的间隙进行局部加密,网格总数为 190 万左右。在计算域进口给定速度,出口给定自由出流。固壁面采用无滑移边界条件,随诱导轮一起旋转的壁面设置为旋转壁面,给定旋转方向和速度。转速为 8 810 r/min。湍流模型选择 RNGk-ε 模型^[10-11]。计算结果显示在设计流量 162 m³/h 时,方案一诱导轮工作面相对速度及压力分布如图 2 和图 3 所示。

在设计流量 162 m³/h 时,方案三诱导轮工作面对相对速度及压力分布如图 4 和图 5 所示。

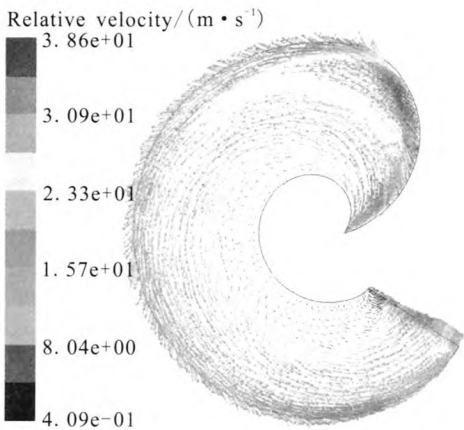


图 2 方案一诱导轮叶片工作面相对速度图
Fig. 2 Relative velocity on blade working face of inducer in Scheme One

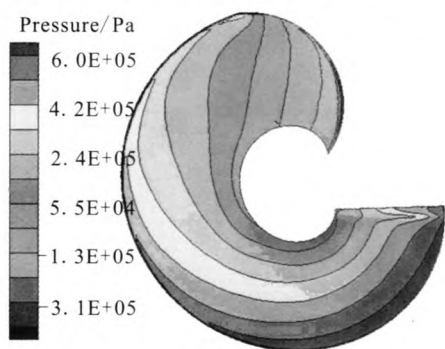


图3 方案一诱导轮叶片工作面压力分布图

Fig. 3 Pressure distribution on blade working face of inducer in Scheme One

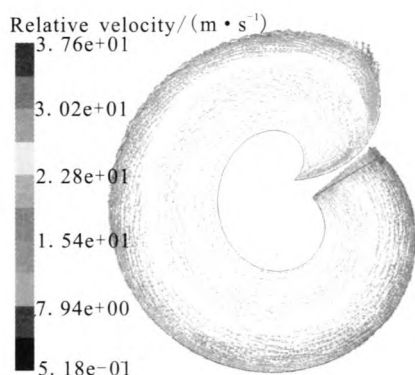


图4 方案三诱导轮叶片工作面相对速度图

Fig. 4 Relative velocity on blade working face of inducer in Scheme Three

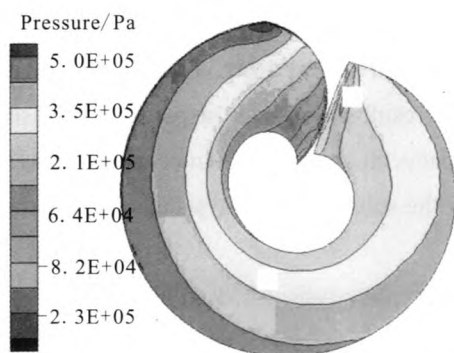


图5 方案三诱导轮叶片工作面压力分布图

Fig. 5 Pressure distribution on blade working face of inducer in Scheme Three

对比2种方案的计算结果可以发现,由于方案一诱导轮出口角大,螺距变化过快,造成液流

在诱导轮叶片工作面的出口位置出现了漩涡。而采用了方案三中的等螺距诱导轮后,液流流动变得相对平稳,原来出现漩涡的现象也随之消失。相对于方案一,方案三的诱导轮出口压力分布更加均匀。

3 结论

1) 进口液流冲角是影响诱导轮汽蚀性能的关键因素,文献[3]研究认为变螺距诱导轮的进口液流冲角可以取0或较小值,文献[2]提进口液流冲角可取 $3^{\circ}\sim 8^{\circ}$,冲角对进口液流角的比值在薄叶片时取低值0.35,厚叶片时取高值0.50,平均值0.425已被优先采用。对于本文研究的卧式高速泵结构形式,诱导轮进口液流冲角在较小值情况下将严重影响泵的汽蚀性能,按照 $3^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 选取汽蚀性能更好。

2) 对于安装诱导轮的离心泵,并非诱导轮的出口角越大,扬程越高,泵的汽蚀效果就越好。诱导轮的螺距变化过快,会影响液体在诱导轮内的平稳流动,造成漩涡。对于本文研究的卧式高速泵结构形式,诱导轮的扬程系数在不高于0.15时,泵才能达到最优的汽蚀效果。

3) 一般认为变螺距诱导轮的汽蚀性能优于等螺距诱导轮,但合理设计的等螺距诱导轮也可以达到极好的汽蚀性能,本文的等螺距诱导轮汽蚀比转数可以达到3500左右,考虑到加工难度和制造成本,在合适的情况下可以选择给高速泵配备等螺距诱导轮。

参考文献:

- [1] 切巴耶夫斯基. 高速诱导轮的汽蚀特性[J]. 水泵技术, 1977 (3): 1-17.
- [2] 醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [3] 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.
- [4] 孙健. 低汽蚀余量的诱导轮研究[D]. 南京: 江苏大学, 2006.
- [5] 徐成波, 骆大章. 高速离心泵中诱导轮与离心轮的匹配关系研究[J]. 水泵技术, 1997 (3): 6-8.

(下转第43页)

3.2 结构优化设计

合理地设计氧气进口的位置、预燃室的结构、煤油喷嘴的结构及电嘴的位置等,使电嘴周围形成良好的点火环境,在一定程度上也能提高高空点火能力。

此外,制约氧气/煤油点火装置点火高度的另一个重要方面就是电点火组件的工作高度。因为随着高度的增加,电点火组件的电嘴能量将下降甚至无法工作,所以提高电点火组件的高空工作性能也是一个很重要的方面。

参考文献:

- [1] BALLAL D R, LEFEBVRE A H. A general model of spark ignition for gaseous and liquid fuel-air mixtures[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1981, 18(1): 1737-1746.
- [2] BALLAL D R, LEFEBVRE A H. Some fundamental aspects of flame Stabilization[C]// 5th International Symposium on Air Breathing Engines. Bangalore: National Aeronautical Laboratory, 1981: 481-488.
- [3] BALLAL D R, LEFEBVRE A H. Basic ignition research related to altitude flight problems' gas turbine combustor design problems [M]. Washington DC: Hemisphere Publishing Corp, 1980: 180-201.
- [4] LEFEBVRE A H, MELLOR A M, PETERS J E. Ignition/stabilization/Atomization: alternate fuels in gas turbine combustors[C]// Combustion and Chemical Kinetics Workshop. Columbia, MD: AIAA, 1978: 137-159.
- [5] BALLAL D R, LEFEBVRE A H. Ignition and flame quenching in flowing gaseous mixtures [J]. *Proceedings of R Soc Land*, 1977, 357: 163-181.
- [6] READ R W, ROGERSON J W, HOCHGREB S. Relight imaging at low temperature, low pressure conditions, AIAA 2008-0957[R]. USA: AIAA, 2008.
- [7] COTE T, RIDLEY J D, CLEMENTS R M, et al. The ignition characteristics of igniters at sub-atmospheric pressure [J]. *Combustion Science and Technology*, 1986, 48: 151-162.
- [8] 邢菲, 张荣春, 樊未军. 主流及掺混气温度对单涡轮油驻涡燃烧室点火及熄火性能影响的试验 [J]. *航空动力学报*, 2008, 23(12): 2280-2285.
- [9] 李庆, 谭建国. 冲压发动机点火性能影响因素研究[J]. *推进技术*, 2013, 34(8): 1082-1087.
- [10] 冯青, 李进武, 张丽. 工程热力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.

(编辑: 马 杰)

(上接第23页)

- [6] 袁丹青, 刘吉春, 丛小青, 等. 变螺距诱导轮内流场空化数值模拟[J]. *排灌机械*, 2008, 26(5): 42-45.
- [7] 赵瑞, 崔宝玲, 朱祖超, 等. 高速诱导轮内部流场的数值计算[J]. *浙江理工大学学报*, 2010, 27(3): 412-416.
- [8] 刘德民, 许洪元. 离心泵诱导轮的数值模拟[J]. *水泵技术*, 2008 (6): 28-32.
- [9] 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.
- [10] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory[J]. *Journal of Scientific Computing*, 1986, 1 (1): 1-11.
- [11] YAKHOT V, ORSZAG S A, THANGAM S, et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique[J]. *Physics of Fluids A*, 1992, 4 (7): 1510-1520.

(编辑: 马 杰)