

中低比转速离心泵修磨叶片形状对其性能影响的试验研究

王斌

(安徽富乐泰水泵系统有限公司 安徽 宁国 242300)

摘要: 对于一些参数不能满足的泵型, 通过修磨叶轮形状或其他方式来达到客户要求参数。本文主要就流量、扬程、效率和汽蚀余量的参数在 10% 范围内的变化时, 对应采取的修磨叶轮方案进行的试验研究, 结果显示各方案都有不同程度的改善, 便于同行业操作者采用相同方案对应处理, 可以重复利用叶轮, 从而达到节能降耗的目的。

关键词: 水泵性能参数; 10% 范围内; 修磨叶轮形状; 试验研究

0 引言

对于水泵的选型, 当我们遇到一些不能满足的参数, 通常情况下会重新设计新的叶轮或者蜗壳, 但此方案对于客户的成本、货期和未知风险都较大。本文采用各种简便的更改叶轮形状的方案, 通过数据分析和大量的实验结果, 研究其对水泵性能参数的影响。其目的是帮助节约客户成本和达到节能降耗, 亦能帮助水泵使用人员对参数调整应对方案参考。

1 测试方案说明

利用富乐泰工厂开式测试台(见图 1), 采用吸上测试, 吸上高度为 1.1m, 进口母管 DN250, 保证进水流速不大于 2.5m/s, 出水通过积水槽和 10m 回流槽后再经过两级稳流格栅, 保证吸入水流处于平稳状态。测试规范参考《GBT 3216-2016 回转动力泵 水力性能验收试验 1 级、2 级和 3 级》。

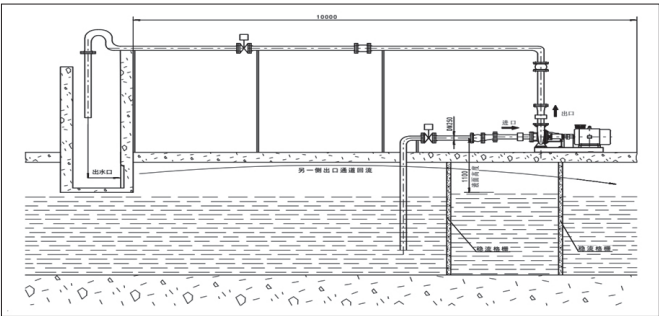


图 1 富乐泰工厂开式测试台

2 叶轮形状变化对参数影响的实验

2.1 扬程 (增高或者降低)

2.1.1 当设计叶轮的扬程高于客户使用需求时, 可以通过切割叶轮外径来降低扬程。切割量可通过式 1 计算得出;

$$\frac{D1}{D2} = \frac{Q1}{Q2} \quad \frac{D1}{D2} = \left(\frac{H1}{H2}\right)^2 \quad \frac{D1}{D2} = \left(\frac{P1}{P2}\right)^3 \quad (式 1)$$

D1: 设计叶轮外径 D2: 客户需求叶轮外径 Q1: 设计叶轮流量 Q2: 客户需求流量

H1: 设计叶轮扬程 H2: 客户需求扬程 P1: 设计叶轮轴功率 P1: 客户需求轴功率

注: 当 D1 与 D2 计算差值超过 5% 时, 需要进行性能测试后再进行计算。

每个设计叶轮的都有一定的允许切割量, 其与比转速有关 (见表 1)。

表 1 比转速和允许切割量

比转速 n_s	60	120	200	300	500
允许切割量 100- (D2/D1) / %	0.2	0.15	0.11	0.09	0.07

2.1.2 当设计叶轮的扬程低于客户使用需求时, 可通过增大叶轮外径 (按照式 1 计算), 或修磨叶轮出口角, 如图 2。

样泵测试: 水泵型号 NLB125/500-90/4, 流量 $Q=300\text{m}^3/\text{h}$, 扬程 $H=64\text{m}$, 转速 $n=1485\text{r/min}$, 比转速 $n_s=68.4$, 分别于修出口前和修出口 $3 \times 30\text{mm}$ 做测试, 对比曲线可见图 3。

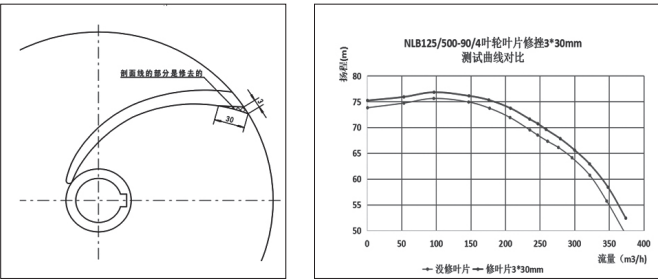


图 2 叶轮叶片修磨示意图 图 3 叶轮叶片修磨测试曲线对比

结论: 做出修磨前后的速度三角形图 4, 实线和虚线分别代表修磨前和修磨后的速度三角形。修磨叶片出口后导致叶轮出口面积 F_{m2} 增大, 在相同流量时, 其轴面速度修磨后 $v'_{m2} < v_{m2}$ 。修磨叶片后, 导致叶片出口角 β_2 增加, 根据速度三角形可以看出, 修磨后的绝对速度增大 $v'_2 > v_2$, 相对速度减小 $\omega'_2 < \omega_2$, 导致了 $v'_{u2} > v_{u2}$ 。根据泵的基本方程式 (式 2) 计算, 修磨叶轮叶片出口后 v_{u2} 增大, 其理论扬程随之增大, 故使离心泵扬程得以提高。

式 2 说明: H_t 为泵理论扬程; g 为重力加速度; u 为圆周速度, v_u 为绝对速度圆周分量; 小标的 1 和 2 分别表示叶轮的进口和出口。

通过图 2 测试对比曲线可以看出, 本型号泵叶轮修磨 $3 \times 30\text{mm}$ 扬程可以增加 2.3%; 结合工厂其他报告, 比转速

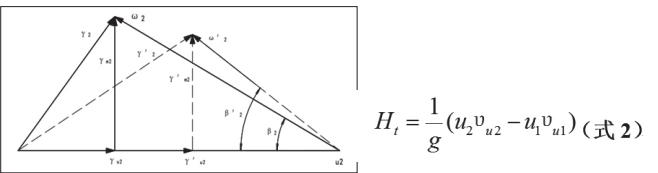


图 4 叶轮出口速度三角形 式 2 泵的基本方程式

在 $n_s=30 \sim 100$ 修搓叶片扬程可以增加 2% ~ 3%; 比转速 $n_s=100 \sim 180$ 时, 扬程增加 3% ~ 6%。

2.2 流量增加

方案 I . 同扬程增加方案, 增加叶轮外径来满足。

方案 II . 在吸入性能无法改善的情况下, 可以通过修薄叶轮进口工作面的方式加大叶轮入口面积来提高水泵流量, 修薄方法见图 5, 保证叶片入口厚度有 2 ~ 3mm, R 角圆滑过渡, 向内延伸 15mm 以上。

样泵测试: 水泵型号 NLB80/260-75KW/2P, 流量 $Q=185\text{m}^3/\text{h}$, 扬程 $H=85\text{m}$, 转速 $n=2950\text{r}/\text{min}$, 比转速 $=87.2$, 分别于叶轮进口修薄前和修薄后做测试, 对比曲线可见图 6。

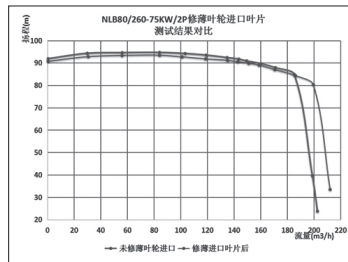
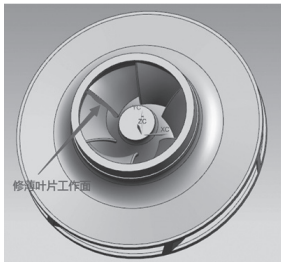


图 5 修薄叶轮进口工作面 图 6 修薄叶轮进口工作面对比曲线

修薄叶轮叶片入口, 增加了叶片进口角, 并增加叶片间面积 F_m , 根据速度三角形, v_{m1} 减小, ω_1 减小, 从而增加进口过流能力, 特别是在大流量点作用更加明显。同时修薄叶片进口也改变叶轮进口安放角, 增大冲角, 改善大流量点运行。

结论: 通过对比曲线可以看出, 在吸深 1.1m 条件下, 大流量点由 $185\text{m}^3/\text{h}$ 增加到 $200\text{m}^3/\text{h}$, 流量增大 7.5%; 同时也做了叶轮进口增大和出口宽度加宽等方法测试, 效率不明显。

2.3 汽蚀性能改善

汽蚀改善往往是通过增加诱导轮的方法, 此方案需要增加泵的轴向尺寸, 改变水泵的安装尺寸, 不利于现场操作。对已生产 (或现有) 的泵型, 可通过图 4 修薄叶轮进口工作面的方法来改善汽蚀性能。

样泵测试: 水泵型号 NLB80/260-75KW/2P, 流量 $Q=180\text{m}^3/\text{h}$, 扬程 $H=75.7\text{m}$, 转速 $n=2950\text{r}/\text{min}$, 比转速 $=95.7$, 分别于叶轮进口修薄前和修薄后做汽蚀测试, 对比曲线可见图 7。

$$NPSH_r = \frac{v_0^2}{2g} + \lambda \frac{\omega_0^2}{2g} \quad \lambda = 1.2 \tan \beta_0 + (0.07 + 0.42 \tan \beta_0) \left(\frac{S_0}{S_{\max}} - 0.615 \right)$$

(式 3 泵汽蚀余量计算) (式 4 谢曼利公式)

式中 λ 代表叶片进口压降系数; S_0 , $S_{\max}$ 代表叶片进口厚度和最大厚度;

修薄叶轮进口作用 1. 改变叶轮进口安放角 β_0 , 增加叶轮正冲角:

a. 叶轮进口角 β_0 增大, 减小叶片进口弯曲, 从而增加了叶片进口面积, 减小叶片的排挤, 进而减小叶片进口 v_0 。

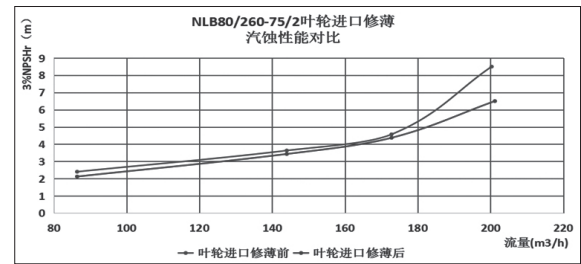


图 7 修薄叶轮进口的汽蚀性能对比曲线

和 ω_0 , 根据式 3 泵汽蚀余量计算公式, v_0 和 ω_0 减小, 汽蚀余量 $NPSH_r$ 变小, 有助于汽蚀余量改善;

b. 在设计流量下采用正冲角, 液体在叶片进口背面产生脱流。因为背面是叶轮流道的低压侧, 在这里形成的漩涡不易向高压侧扩散, 所以漩涡是稳定的, 局部的, 对汽蚀的影响较小。反之, 采用负冲角时, 液体在叶片进口的工作面产生脱流。该处时叶轮流道的高压侧, 漩涡容易向低压侧扩散, 因而漩涡时不稳定的, 对汽蚀影响较大;

c. 从“图 8 叶片进口处正角”看出采用正冲角, 能改善在大流量下的工作条件。

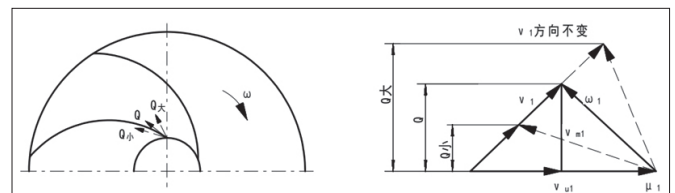


图 8 叶片进口处正角

修薄叶轮进口作用 2. 减小叶片进口厚度: 根据式 3 汽蚀余量计算公式和式 4 谢曼利公式, 叶片进口厚度变薄后, $S_0/S_{\max}$ 比值变小, 从而 λ 叶片压降系数变小, 使其汽蚀余量 $NPSH_r$ 变小。

通过图 7 修薄叶轮进口的汽蚀性能对比曲线可以看出, 修薄叶轮进口小流量点 ($85 \sim 175\text{m}^3/\text{h}$), 汽蚀余量 $NPSH_r$ 提高了 0.2m, 在 $175\text{m}^3/\text{h}$ 以后汽蚀性能改善更加明显, 符合作用 1 中 c 点理论分析。

2.4 提高水泵效率

泵的总效率等于机械效率 η_m 、容积效率 η_v 和水力效率 η_h 的乘积。

机械效率 η_m 为轴承损失功率、密封损失功率、圆盘损失功率 (克服叶轮前、后盖板表面与壳体间液体的摩擦损失) 之和的比例计算; 容积效率 η_v 为进出口压差使得通过叶轮一部分液体从泵腔经叶轮密封环间隙向叶轮进口逆流引起的容积损失比例计算; 水力效率 η_h 为液体在泵过流部分的流动中伴随的水力摩擦损失和冲洗、脱流、速度方向及大小变化引起的水力损失比例计算。

提高水泵效率与以上降低上述的三种损失有关, 其中机械效率 η_m 中的圆盘损失功率、水力效率 η_h 中水力摩擦损失与液体阻力有关。由于泵类过流部件 (泵体 / 泵盖 / 叶轮) 均为砂型铸造件, 其粗糙度在 $Ra25$ 以上, 内部扭曲面达到 $Ra50$, 提高过流部件的光洁度, 可以减小液体阻力, 减低水

力摩擦损失,从而提高水泵效率。本文采用美国贝尔左纳公司生产的超光滑“BELZONA 1341”节能涂层,其材料属于高性能减摩材料为基材的聚合合金复合材料,摩擦系数低,机械表面涂装超滑金属涂层后,其表面光洁度得到很大的提高,变得非常光滑,且结合力强,并对设备有防腐蚀的作用。

按照操作规程:1、对泵的过流部件做欲清洁,保证涂装面无杂质,并去除铁锈;2、喷砂处理,保证粗糙度达到 $75\mu\text{m}$,以便涂层附着力;3、用丙酮清洁已处理的涂装面;4、对非施工面做保护后开始涂装(见图9);5、检查所有涂层面是否光滑过渡,有无流挂或凸起部位;6、自然固化3小时。

样泵测试:水泵型号 NLB125/320-30KW/4P, 流量 $Q=240\text{m}^3/\text{h}$, 扬程 $H=30\text{m}$, 转速 $n=1475\text{r}/\text{min}$, 比转速 $=108.4$, 分别于节能涂层前和涂层后做效率测试,对比曲线

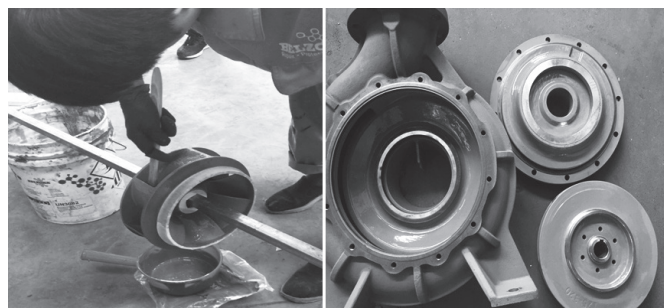


图9 节能涂层方法
可见图10。

结论:通过“图10节能涂层前、后效率对比曲线”可以看出,在最高效率点其效率增加了3个点。同时对富乐泰工厂 NLB65/200-30KW/2P ($Q=127\text{m}^3/\text{h}$, $H=59.5\text{m}$, $n=2950\text{r}/\text{min}$) 的涂层前后测试报告进行对比,在最高效率增加了4.5%,可见此方案对大泵或者小泵的效率提高有明显的效果。

2.5 消除驼峰点

一般离心泵叶轮的出口边与轴线平行,由于前后干板流长度不同,流体流经前后盖板后,在出口处所获得的能量也不同,产生了由后盖板到前盖板的二次回流,这不但增加了水力损失,而且还是扬程曲线产生驼峰,斜切叶轮后盖板,可使流经前后盖板的液体所获的能量基本相同,是减小或消除驼峰的有力措施,具体叶轮切割方式可见图11。

样泵测试:水泵型号 NXCH200/315-45KW/4P, 流量 $Q=360\text{m}^3/\text{h}$, 扬程 $H=30\text{m}$, 转速 $n=1480\text{r}/\text{min}$, 比转速

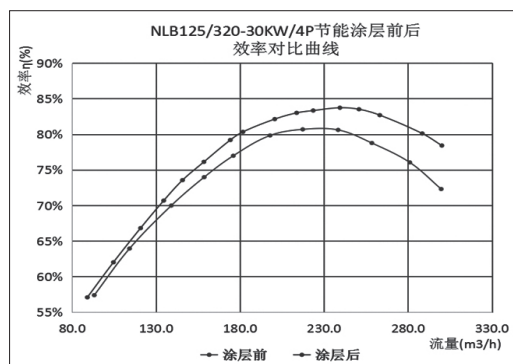


图10 节能涂层前、后效率对比曲线

$n_s=133.3$, 分别于切割前和切割后做对比,对比曲线可见图12。

结论:通过“图11叶轮斜切曲线变化”可以看出,关死点流量下的扬程已调整为最高扬程,其效果明显度与斜切角度有关。叶片出口斜切,消除了出口回流区,改善二次回流对性能的影响,提高小流量点压力。该方案对客户参数有限,不能最大叶轮外径供货。另做了V形切割方案,未解决驼峰问题。另做磨短泵体隔舍10mm方案,未有任何改变,可供参考。

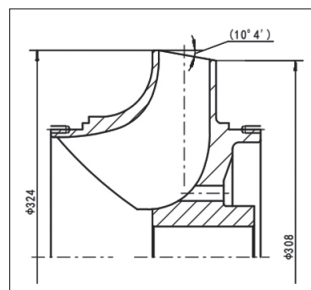


图11 叶轮斜切方法

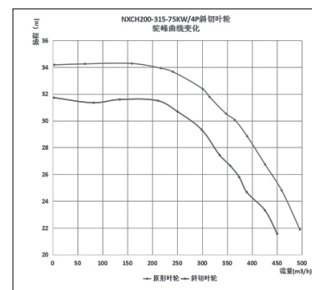


图12 叶轮斜切曲线变化

3 结语

- (1) 切割叶轮外径可降低水泵的扬程,修磨叶片出口角可增加2%~6%扬程;
- (2) 修薄叶轮进口即可增加水泵流量5%~10%,也有助于改善汽蚀性能;
- (3) 对过流部件进行涂刷节能涂层,可以有效提高2%~5%效率;
- (4) 斜切叶轮可以消除驼峰。

以上方案均在现有的泵产品上,进行修磨叶轮形状来满足客户需要参数,其提高能力只能在10%范围内,不需要单独设计叶轮或者制作叶轮,有助于节能降耗。当客户需求较大时,还是需要重新选型或者更换叶轮等。

注:富乐泰测试中心取得由国家水泵及系统工程技术研究中心的1级精度证书。

参考文献:

- [1] 关醒凡. 现代泵理论与设计 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [2] 袁寿其. 低比速离心泵理论与设计 [M]. 北京: 机械出版社, 1997.
- [3] 牟介刚, 张生昌, 等. 离心泵性能曲线产生驼峰的机理及消除措施 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(4): 56-59.
- [4] 牟介刚, 李思, 等. 离心泵叶轮出口盖板形状对水力性能的影响 [J]. 排灌机械, 2009, 27(5): 323-326.
- [5] Christopher Earls Brennen, Hydrodynamics of Pumps, Original English edition published by Cambridge University Press, England, 2011.
- [6] 郑梦海. 泵测试实用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [7] 张克危. 流体机械原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [8] 白羽, 刘厚林, 等. 修磨叶片出口对离心泵内流场及叶轮强度的影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(10): 852-857.
- [9] 刘光洁, 黄伟, 等. 超滑金属涂层在水泵上节能应用的研讨 [J]. 装备制造技术, 2009(12): 18-19.