低比转速叶轮叶片数的选择准则

严 敬，潘光玉，阚能琪，王 桃
（西华大学 能源与环境学院，四川 成都 610039）

摘 要：离心叶轮叶片数的正确选择是提高叶轮水力性能的重要措施.通过考查国外最新速度系数法设计资料和分析影响叶轮流道脱流和园盘摩擦损失的多种因素，提出了与传统观点相反的结论：增加低比转速离心叶轮叶片，并不是改善叶轮水力性能的有效途径，在合理选定叶片包角、叶轮出口宽度及优化叶轮直径的条件下，适当降低低比转速叶轮叶片数，对提高叶轮水力效率、消除离心泵的特征曲线的驼峰都有重要意义.这一新观点为设计人员正确确定低比转速叶轮叶片数提供了重要参考.

关键词：离心泵；低比转速；叶轮；设计；叶片
中图分类号：TH31 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-6254(2008)01-0018-03

Criteria of blade number selection for low specific speed impeller

YAN Jing, PAN Guang-yu, KAN Neng-qi, WANG Tao
(School of Energy and Environment, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039, China)

Abstract: Correct selection of blade number is of vital importance to improve the impeller hydraulic performance. By studying latest data presented by foreign experts and analyzing various factors influencing flow separation and disc friction, the authors draw a conclusion which is opposite to the traditional view: increasing blade number is not an effective way to improve impeller hydraulic performance; instead, after determining wrapping angle of blade, width of impeller at exit and optimizing impeller discharge diameter, reducing blade number to some extent will be beneficial to raise impeller hydraulic efficiency and eliminating hump of pump head-capacity curve. The new theorem provides valuable reference for impeller designers in determining blade number of low specific speed impellers.

Key words: centrifugal pump; low specific speed; impeller; design; blade

离心叶轮的叶片数 z 是关系到叶轮扬程、运行效率等叶轮重要性能的基本结构参数.到目前为止，还不能完全以理论方法准确确定叶轮的叶片数 z 值.但是，理论分析能为可靠的 z 值选择提供依据.在考虑了叶轮叶片间的轴向漩涡之后，叶轮产生的理论扬程 H_T 为[1]

$$H_T=\frac{\omega R_2}{g}\left(\omega R_2-\frac{\pi\omega R_2\psi_2\sin\beta_2}{z}-\frac{Q_T\cot\beta_2}{2\pi R_2 b_2\psi_2}\right) \quad (1)$$

式中 R_2 为叶轮半径，m；b_2 为出口宽度，m；ψ_2 为出口排挤系数；β_2 为安放角，(°)；ω 为叶轮旋转角速度，rad/s；Q_T 为通过叶轮的理论流量，m^3/s. 其中 $\pi\omega R_2\psi_2\sin\beta_2/z$ 表示叶片间轴向漩涡流动在叶轮出口圆周引起的相对速度，其值降低了无限叶片叶轮产生的理论扬程，这一现象称为“滑移”.可以看到，z 越大，轴向漩涡相对速度就越小，叶轮产生的理论扬程就越高.当 z 为无穷大时，轴向漩涡将不存在.反之，当叶轮设计点理论扬程 H_T 给定后，较大的 z 值

收稿日期：2007-09-05
作者简介：严 敬(1947—)，男，江苏苏州人，教授，主要从事泵类机械流场分析及设计新方法的研究.
潘光玉(1981—)，男，山东五莲人，硕士研究生(pgy_3721@163.com)，主要从事泵类流场分析及设计新方法的研究.

万方数据

决定的叶轮半径 R_2 将较小. 式(1)是Stodola以势流理论导出的. 反映"滑移"对叶轮理论扬程 H_T 影响的经验公式还有一些,但是,它们所反映的叶片数 z 和 H_T 的关系或 z 与 R_2 的关系都有与上面一致的定性规律.

式(1)只适合于叶片表面无脱流的运行工况,叶片表面的脱流现象也与叶片数有关. 水流从叶片进口流向出口是在一扩散的逆压区内流动,z 值越大,叶片流道的扩散程度就越小,在叶轮产生的理论扬程决定的叶轮内逆压梯度一定时,水流从叶片表面脱流的可能性就越小.

低比转速叶轮效率一般很低. 为产生相对较高的扬程,低比转速叶轮半径 R_2 应有较大值,由此引起的相对较高的圆盘摩擦损失将严重降低泵的机械效率. 同时,较高的叶轮扬程决定了低比转速叶轮流道逆压梯度较高,在流道扩散严重时,叶片表面脱流甚至在设计点也难以避免. 低比转速叶轮的这些力学特性似乎决定了叶轮比转速越低,叶轮叶片数应越多,这样可以同时克服低比转速叶轮上述两项不足. 这一原则也体现在一些早期的经典专著中. 比如,文献[2]推荐,中比转速叶轮的 $z = 6 \sim 8$,低比转速叶轮的 $z = 8 \sim 9$. 文献[3]推荐的叶轮比转速与叶片数 z 关系见表1,同样体现了 z 随比转速减小而增大的原则.

表1　叶轮比转速与叶片数的关系

Tab.1　Relationship between specific speed and blade number

n_s	30~45	5~60	60~120	20~300
z/个	5~10	7~8	6~7	4~6

1　低比转速叶轮叶片数选取新准则

近年来,随低比转速泵特性的研究的广泛开展和设计实践的深化,有越来越多的成功设计完全放弃了上述叶轮叶片选择原则,不少优秀叶轮的 z 值都小于推荐值.

文献[4]较好地总结了西方近年叶轮研究的成果,在大量统计的基础上,文献给出了叶片数与比转速关系的速度系数法,如图1所示.

图1中的纵坐标表示设计泵关死扬程超过设计扬程的百分比. 可以看到,不论设计人员确定的这一值为多少,随横坐标比转速 n_s 减小(图1比转速为美制,n_s(美) = 14.16 n_s(中)),叶片数 z 和叶片出口安放角 β_2 都是减小的. 西方优秀叶轮的这一统计规律与传统认识正好相反.

文献[3]给出了一个有影响的叶片数估计式

$$z = 6.5\frac{R_2 + R_1}{R_2 - R_1}\sin\left(\frac{\beta_2 + \beta_1}{2}\right) \qquad (2)$$

式中 R_1 和 β_1 分别指叶片进口半径和进口安放角. 这个半理论半经验的叶片估算公式的实质也隐含了叶片数 z 应随比转速降低的规律. 式(2)中,$\frac{R_2 + R_1}{R_2 - R_1} = \frac{1 + R_1/R_2}{1 - R_1/R_2}$,令 $\frac{R_1}{R_2} = k$,则该项成为 $\frac{1+k}{1-k}$,而 $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}k}\left(\frac{1+k}{1-k}\right) = \frac{2}{(1-k)^2}$,恒为正值,表明 k 越小,也即 $\frac{R_1}{R_2}$ 越小,$\frac{R_2 + R_1}{R_2 - R_1}$ 这一项就越小. 叶轮的比转速越小,叶片的轴面投影图就越狭长,R_1/R_2 就越小,因而比转速越低的叶轮叶片数就应越小. 式(2)中第二项的 β_2 与叶轮进口结构,如进口直径,叶片进口边位置有关,与比转速没有确定的函数关系. 但图1及叶轮参数优化结果都表明[1],叶片出口安放角 β_2 应随比转速减小而减小,因而 z 也与比转速正相关. 这一公式实际也给出了与传统认识相反的 z 值选择原则.

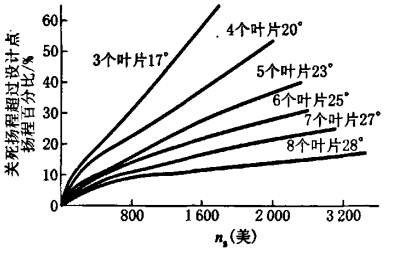


图1　叶片数和叶片出口安放角与比转速的关系

Fig.1　Relationship between specific speed and β_2, z

传统的低比转速叶轮叶片选择原则难以正确指导叶轮设计实践的原因,是因为这一原则的理论分析中含有片面性.

叶轮叶片间流道扩散程度与叶片数有关,同时也与叶片包角 ϕ 有关. 在 z 值一定时,较大的 ϕ 值对应的流道长度较大,同样降低了流道的扩散程度,有利于抑制叶片脱流,见图2. 文献[5]给出了乘积 $z\phi$ 与比转速数的关系,表明了 z 和 ϕ 的互补性. 同时可以看出,这一乘积是随比转速降低而增大的. 事实上,国内设计人员在大量设计实践基础上提出的低比转速叶轮"少叶片大包角"的设计原则正是对这一关系的概括[6]. 文献[5]推荐的 $z\phi$ 与比转速 n_s 的关系见表2.

万方数据

表2 $z\phi$ 与比转速 n_s 的关系

Tab.2 Relationship between specific speed n_s and $z\phi$

n_s	35~50	55~70	80~120	130~220	230~280
$z\phi/360$	2.1~2.3	1.9~2.1	1.7~1.9	1.5~1.8	1.4~1.7

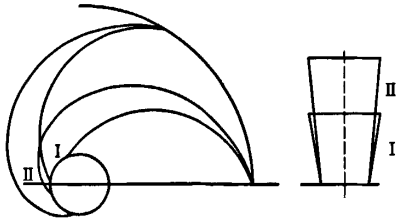


图2 叶片包角与扩散度

Fig.2 Wrapping angle and divergency

式(1)表明,增大 z 值可以提高叶轮扬程,或在扬程一定时减少叶轮直径,但式(1)也同样表明,增大叶轮出口宽度 b_2,以及以减小叶轮半径 R_2 为目标优化求得 β_2,也能达到同样的目的.事实上,优秀低比转速叶轮的 b_2 值都相对较大,对 β_2 优化的结果表明,β_2 随比转速降低而下降[7,8],与图1规律一致.

由此可见,通过增大叶轮数所能实现的目标,都可以通过改变其他叶轮几何参数获得.降低 z 值后可以从以下多个方面改善叶轮性能:减小水流摩擦面积;避免泵的 $H-Q$ 曲线出现驼峰,这从无驼峰条件可以看出[1],$\beta_2 z^{0.773} < 90$.减少 z 值也减小了叶片排挤,为水流留让了更大的过流空间,降低了叶片间流道的平均相对速度值.对于小流量小尺寸的叶轮,降低 z 值特别有意义.这种叶轮入口部分空间本来就比较紧张,过多的叶片数将在此构成严重阻塞,排挤系数有时降低到0.6以下,较高的叶片入口相对速度将产生明显的入口冲击损失,由此降低了叶轮水力效率和抗空化能力[9].

2 结 论

通过对叶轮内流动特点的全面分析和考察最新国内外设计资料,指出了传统的低比转速叶轮叶片数选择原则的片面性,提出了叶轮叶片数应随比转速降低而减小而不是增大的新见解.在对大量优秀低比转速叶轮几何参数统计的基础上,文献[1]推荐了叶片数 z 与叶轮比转速 n_s 关系,见表3.表中 D_0 指叶轮进口直径.

表3 低比转速叶轮叶片推荐值

Tab.3 Recommended blade number for low n_s impellers

n_s	20~30	30~45	45~60
$D_0>35$ mm	4	5	6
$D_0<35$ mm		4	

作者新观点的正确性已为许多成功设计所证实.曾完成了一潜水泵的水力改型设计.该泵比转速仅为23.如果坚持传统的观点,该叶轮叶片数应为6~8,而我们实际只取了4,但叶片包角达到210°,型式试验表明,泵在设计点的效率提高了3.8%.

参考文献(References)

[1] 严 敬. 低比转速离心泵[M]. 成都:四川科学技术出版社, 1999.

[2] 查 森. 叶片泵原理及水力设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1988.

[3] 丁成伟. 离心泵与轴流泵[M]. 北京:机械工业出版社, 1984.

[4] Lobanoff. *Centrifugal Pumps: Design & Application*[M]. Houston: Gulf Publication Company, 1994.

[5] 陈乃祥. 离心泵[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.

[6] Yan J, Lu H. *A Program for Determining Impeller Geometric Parameters with Minimum Shaft Power*[C]//第十七届全国水动力学研讨会暨第六届全国水动力学学术会论文集,北京:海洋出版社, 2003.

[7] Dick E. Optimum Design of Centrifugal Fans and Pumps [J]. *Europen Journal of Mechanical Engineering*, 1992, 37(1):9-18.

[8] 阎永强,梁武科. 遗传算法在离心泵叶片优化设计中的应用[J]. 排灌机械, 2004,22(2):5-7.
YAN Yong-giang, LIANG Wu-ke. Prospect of Genetic Algorithm to Optimization Design of Blade for Centrifugal Pump Impellers[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2004,22(2):5-7. (in Chinese)

[9] 戴玉姝,王 霄,蔡 兰. 离心泵叶轮扭曲叶片参数实体造型方法探讨[J]. 排灌机械, 2004,22(1):20-22.
DAI Yu-shu, WANG Xiao, CAI Lan. Study on 3D Solid Modelling for Centrifugal Pump Blade of Impeller[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2004,22(1):20-22. (in Chinese)

(责任编辑 贾国方)

万方数据