广义交替加载技术及其在离心泵和混流泵叶轮逆向设计中的应用

王超越¹, 王福军^{1,2*}, 安东森¹, 姚志峰^{1,2}, 肖若富^{1,2}, 陆力^{2,3}, 何成连⁴, 邹志超³

1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 北京市供水管网系统安全与节能工程技术研究中心, 北京 100083;

3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

4. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222

* E-mail: wangfj@cau.edu.cn

doi: 10.1360/SST-2021-0147

泵叶轮的逆向设计是一种以流动理论为指导的水力设计方法, 由Zangeneh和Goto等发展的Z-G方法^[1]是目前最常用的叶轮逆向设计方法. 该方法基于势流理论, 建立了包含流场信息和叶片几何信息的封闭方程组, 并以“叶片载荷分布”和“叶片堆栈条件”为定解条件来实现叶片形状的迭代求解^[2]. 根据Z-G方法的基本原理, 出现了许多能够抑制二次流、降低压力脉动的泵叶轮设计技术, 如离心泵叶轮交替加载技术(alternate loading technique, ALT)^[3]. 然而, 包括ALT在内的现有以Z-G方法为基础的设计仍存在明显的缺陷是所给出的叶片加载方式难以实现对叶轮内二次流的“高效”控制, 需要在进一步理清叶轮内二次流产生过程的基础上提出更具普适意义的加载方法.

(1) 叶轮内二次流产生机制

为阐述离心泵叶轮内二次流的产生机制, 基于“定常、无黏、叶片零厚度”的基本假设, Zangeneh等人^[2]提出了一个有重要影响的运动学方程:

$$\mathbf{V}_r \cdot \nabla (\mathbf{V}_r \cdot \boldsymbol{\Omega}_a) = 2\boldsymbol{\Omega}_a \cdot (\mathbf{V}_r \cdot \nabla \mathbf{V}_r) + \boldsymbol{\Omega}_a \cdot (2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}_r), \quad (1)$$

式中, $\mathbf{V}_r$ 为相对速度, $\boldsymbol{\Omega}_a$ 为绝对涡量, $\boldsymbol{\omega}$ 为叶轮角速度. 然而, 该方程存在的问题是, 绝对涡量不能合理表征涡旋, 拟螺旋度 $\mathbf{V}_r \cdot \boldsymbol{\Omega}_a$ 不能合理表征二次流, 故其只能对

二次流产生机制作粗略的定性解释, 难以直接指导二次流的控制. 为此, 从相对运动的力学平衡关系出发, 本文作者推导了一个新的运动学方程:

$$\Delta I_p - 2\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla \times \mathbf{V}_r = 2Q_r, \quad (2)$$

式中, $I_p = p/\rho - \omega^2 r^2/2$ 为势转子焓, Q_r 为经典涡旋识别准则. 该式表明, 叶道内的二次流($Q_r > 0$)由势转子焓和科氏力共同驱动. 在理想条件下, 叶道内的流动完全符合叶片的几何型线, “功能协调条件” $-\mathbf{V}_r \cdot \nabla I_p = 0$ 可被满足(图1(a)). 因科氏力始终不做功, 故在实际条件下, 势转子焓梯度(PRG) $-\nabla I_p$ 就成为主动诱导二次流的唯一动力源. 相比于Z-G方法, 这一新的方程更清晰地描述了叶轮内二次流的宏观产生机制, 有助于设计者更明确地理解叶轮内的本质流动特征.

(2) 叶轮内PRG分布特征

势转子焓梯度是叶轮内二次流产生的主动力源. 理论研究发现(图1(a)), 在叶轮前部, 后盖板流线处的 I_p 大于前盖板流线, 故在S2流面上表现出固有的由后盖板到前盖板的 $H \rightarrow S$ 型二次流; 在叶片中部, I_p 的最大值会出现在叶片压力面, 故在S1流面上表现出固有的由压力面到吸力面的 $P \rightarrow S$ 型二次流, 即产生“轴向涡旋”; 而在靠近叶片出口边的叶轮后部, 叶片压力面和吸力

英文全文见: Wang C Y, Wang F J, An D S, et al. A general alternate loading technique and its applications in the inverse designs of centrifugal and mixed-flow pump impellers. Sci China Tech Sci, 2021, 64: 898–918, <https://doi.org/10.1007/s11431-020-1687-4>

图1 (网络版彩图)广义交替加载技术

Figure 1 (Color online) General alternate loading technique.

面上 I_p 的差异逐渐减小, 逐渐占优的科氏力会导致流动由吸力面偏向压力面, 即产生“速度滑移”型二次流在结构形式与离心泵相近的混流泵叶轮内部也具有类似分布。相比于Z-G方法, 这一理论分析更清晰地勾勒出泵叶轮内固有的PRG分布特征, 有助于设计者进一步理清叶轮内典型二次流的产生过程。

(3) 广义交替加载技术

基于叶轮内PRG的固有分布特征, 本文作者建立了叶片载荷分布与二次流产生之间的关系:

1) 叶轮前部后盖板流线上 δp 快速增加会导致后盖板侧的 I_p 过快增长, 这会助长固有的不利PRG, 从而更易诱导H→S型二次流;

2) 叶片中部各流线上的 δp 过高会导致中缝压制不足、轴向涡旋加剧, 这会助长固有的不利PRG, 从而更易诱导P→S型二次流;

3) 叶轮后部前后盖板流线上的 δp 差异过大会导致速度滑移与不利PRG进一步叠加, 这会严重降低叶轮出口流动的均匀性。

根据上述关系, 提出了新的更具普适意义的叶片

加载方式(图1(b)), 本文作者将这种通过调节PRG分布针对性地抑制典型二次流的水力预控技术称为“广义交替加载技术”(general alternate loading technique, GALT)。相比于ALT等现有设计技术, GALT因更清晰的理论基础而拥有更具针对性的设计准则, 它以尽可能降低经验参与的方式给出了“好叶轮”的“设计方向”, 从而允许设计者能深刻把握叶轮内的本质流动特征以避免首先陷入到黑箱式的寻优计算中。

将GALT应用至3种典型泵型(立式离心泵、双吸离心泵、混流泵)的叶轮逆向设计中, 并针对不同的改进目标进行详细的对比分析。结果表明, 合理使用GALT能有效调节泵叶轮内的PRG分布并抑制典型二次流, 从而有效拓宽水泵高效区、提高流动均匀性、抑制压力脉动。相比于目前以Z-G方法为基础的设计技术, GALT因其更清晰的理论基础而能更好地表现出“去经验化”的优点, 其设计准则允许设计者在明确把握叶轮内本质流动特征的基础上来快速地获得高性能产品, 这能为叶片泵叶轮的高效设计奠定重要基础。

参考文献

- Goto A. Historical perspective on fluid machinery flow optimization in an industry. *Int J Fluid Mach Syst*, 2016, 9: 75–84
- Zangeneh M, Goto A, Harada H. On the design criteria for suppression of secondary flows in centrifugal and mixed flow impellers. *J Turbomach*, 1998, 120: 723–735
- Wang F J, Yao Z F, Yang W, et al. Impeller design with alternate loading technique for double-suction centrifugal pumps (in Chinese). *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2015, 46: 84–91 [王福军, 姚志峰, 杨魏, 等. 双吸离心泵叶轮交替加载设计方法. 农业机械学报, 2015, 46: 84–91]