

混流式水轮机转轮 X 型叶片的水力特性

周凌九

王正伟

(中国农业大学水利与土木工程学院) (清华大学)

摘要 X 型叶片作为国外先进水轮机设备的关键部件,对其结构和水力特性的研究是很有必要的。在反复设计和计算的基础上,摸索和总结出一些 X 型叶片的结构特点和水力特性。分析表明, X 型叶片的主要结构特点为:叶片进口均有“负倾角”,靠近上冠处翼形为负曲率。同时,为适应能量转换和出口条件的要求,叶片出水边不在轴面上,而成一空间曲线。由于 X 型叶片的以上特点,使叶片间流道内液体的流动趋于顺畅均匀,消除了常规叶片正面常见的“横流”现象,减轻了叶片近下环处的负荷集中,在提高水轮机的运行效率,增加过流量和改善转轮空化性能,及转轮受力状况等方面都有较大潜力。

关键词 混流式水轮机; X 型叶片; 水力性能

中图分类号 TK 730.323; TK 733.1

Hydraulic Performance of X-type Blade Used in France Turbine

Zhou Lingjiu¹, Wang Zhengwei²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract X-type blade is a new concept of runner design. The analysis and results on X-type blade based on numerical simulation were developed. It was identified that X-type blade inlet has a negative blade angle, special profiles near crown and outlet edge not lying on meridian plan. Fluid flowing benefit from above geometric feature and tend to be more fluent and evenly distributed. “Cross flow” often observed in conventional blade pressure side is removed under most conditions. Load across blade from crown to band is balanced. All these characteristics showed that X-type blade has potentials in improving efficiency, increasing discharge or improving cavitation performance and giving better strength condition.

Key words francis turbine; X-type blade; hydraulic performance

随着水轮机制造技术的发展,尤其是五坐标数控机床等先进制造设备的引进和使用,水轮机转轮叶片的生产手段和方式较传统的有了很大的改进。在混流式水轮机转轮叶片的设计中,一种新型的叶片逐渐引起人们的重视,这就是所谓的 X 型叶片^[1]。

X 型叶片为国外先进水轮机设备的关键部件,其技术具有保密性,在专业文献中很难找到相关的设计理论和设计技术。为此,作者在对少量国外文献进行研究的基础上,经过大量的设计计算,摸索和总结出一些 X 型叶片的结构特点和水力特性。

收稿日期: 2002-01-22

周凌九,北京清华东路 17 号 中国农业大学(东校区)58 信箱, 100083

1 混流式水轮机转轮 X 型叶片的设计思想

在 X 型叶片的设计思想中, 一个主要的思路是, 充分利用流道空间, 使叶片表面的压力分布尽量均衡。

传统叶片由于叶片加工方法和叶片设计思想的约束, 往往出现叶片近上冠和近下环的流道内流量和压力分布不均: 一般近上冠处叶片的负荷较小, 而在近下环处负荷很大, 这不仅使叶片的受力特性变差, 还使转轮的过流量不易提高, 同时, 在转轮叶片背面近下环处容易发生空化现象。

有关叶片设计中, 使压力分布均衡化的技术文献最早集中于如何合理设计翼形形状。主要体现在, 采用二元理论设计方法时, 如何合理选择叶片上的环量分布, 以及在进行叶片骨线加厚的过程中, 如何选取叶片的厚度分布等方面。从均衡化的角度而言, 以上技术仅解决了从叶片进口到出口这一方向上压力的均衡问题。

如果将叶片上的压力分布看做一个空间问题, 那么, 均衡化应该不只体现在从叶片进口到出口这一方向上, 还应同时体现在从上冠到下环的方向上。就笔者查阅的资料来看, 文献[2]对这一问题的研究进行了详细报道。在这篇文献中提出了“叶片倾角”(blade lean)的概念。在 X 型叶片设计中, “叶片倾角”成为一个十分关键的参数。“叶片倾角”的正负和大小与叶片上从上冠到下环方向上的负荷分布密切相关。

由于 X 型叶片采用了所谓“负倾角”, 使其结构与常规叶片有较大差别。主要体现在以下几个方面。

1) 叶片倾角。X 型叶片采用“负倾角”。从进口看去, X 型叶片的进口边与出口边成 X 型交叉。为比较起见, 图 1 同时给出了 X 型叶片转轮与常规转轮的立体效果及叶片倾角示意。可以看到, 由于采用了叶片“负倾角”, X 型叶片的近上冠处翼形与常规叶片有较大区别。

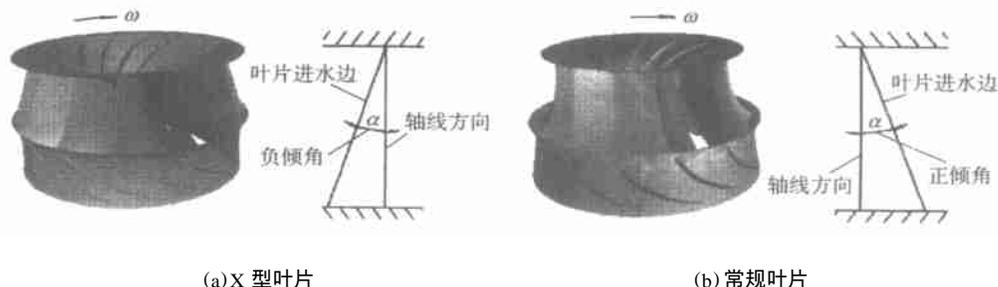


图 1 X 型叶片转轮及常规叶片转轮的立体效果及叶片倾角

2) 叶片上冠。由图 1(a) 可见, X 型叶片的近上冠部分向外凸鼓, 而常规叶片在整个叶片区域, 叶片形状为内凹形状。正是这种看似扭曲的 X 型叶片形状, 消除了叶片正面的横流, 从而使叶片上的压力分布更加均匀。

3) 叶片出水边。常规叶片为了满足传统加工技术的要求, 一般将叶片出水边放在同一个轴面上形成加工基准。这种约束在较大程度上制约了设计者对出口边形状和出口流态的调整, 从而限制了转轮的形状和性能。X 型叶片出水边为一空间曲线, 可以根据设计要求对出水边进行相应调整, 使叶片上压力均布, 出口流态更合理。

2 X 型叶片的水力特性

2.1 水力性能研究方法

为研究 X 型叶片的水力性能, 采用先进的 CFD 技术计算了同一比转速系列的常规水轮机和 X 型叶片水轮机的内部三维黏性流场。在计算中, 采用了 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型 (renormalization group based $k-\epsilon$ model), 同时利用 SIMPLEC 方法 (Consistent Semi-implicit method for pressure-linked equation) 实现了连续方程与动量方程的耦合, 采用四面体非结构型网格划分计算区域, 采用有限体格式对上述方程进行离散。变量储存在控制体中心。其中, 动量方程的对流项采用二阶迎风差分格式, 扩散项采用中心差分格式, 由于离散中要求控制面上的压力值, 对压力项采用动量方程系数为权重系数进行插值。以上计算方法经试验数据验证是可靠的^[3]。

2.2 转轮内的流态

从流态来说, X 型叶片的最大特点是, 大部分工况区消除了叶片正面的横流, 从而使上冠进口处基本没有脱流, 图 2 为 X 型叶片与常规叶片正面的速度矢量图。可见, 在常规叶片正面靠近上冠区域, 在进口边附近 $1/4$ 的叶片宽度内有明显的横流 (从上冠指向下环的流动), 而且一些实际观察表明, 即使在设计工况附近, 常规叶片正面也有横向流动。而 X 型叶片上的流动基本上是从进口流出口, 在大部分工况下, 叶片上基本消除了横流。

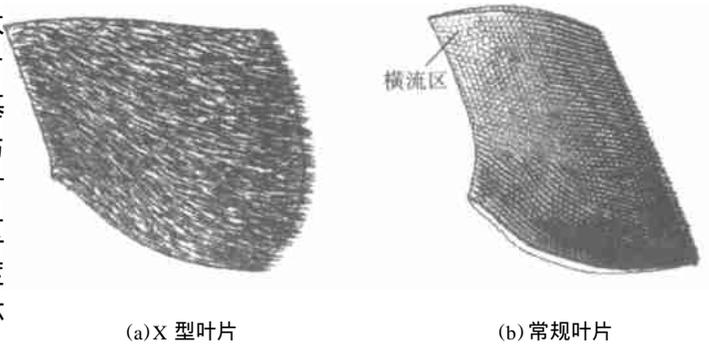


图 2 X 型叶片与常规叶片正面流态

图 3 为 2 种叶片近上冠处的流态。可以看到, 常规叶片横向存在流动与上冠进口处的局部漩涡有密切关系。由于这种流态的存在, 一方面使大部分流量向下环区域集中, 使下环区的流速增加, 负荷加重; 另一方面, 流过转轮内的水流在流态调整过程中产生了能量消耗, 使水力损

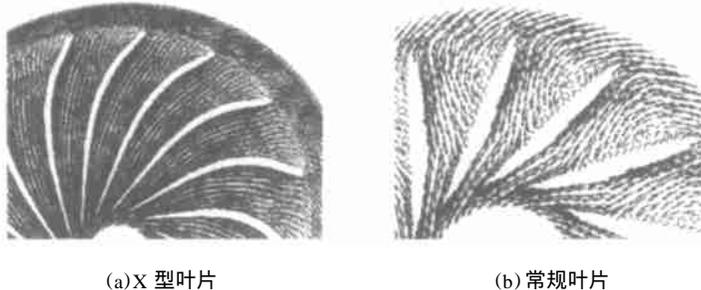


图 3 X 型叶片与常规叶片近上冠处流态

失增加。而X型叶片由于采用了“负倾角”，同时叶片上冠型线更加合理，叶片间的流动顺畅，速度和负荷分布趋于均匀。

2.3 叶片正背面压力分布

在设计点附近，2种叶片的压力等值线见图4。为了更清楚地说明负荷分布情况，图5分别示出2种叶片近上冠处和近下环处的压力分布。可见，X型叶片从上冠到下环，从进口到出口，正背面的压力分布很均匀。而对常规叶片来说，由于叶片正面横流的影响，负荷主要集中在近下环区域，且叶片尾部负荷加重，这使得常规叶片在同样流量情况下，叶片出口背面处的压力很低，容易在该区域形成空化破坏。

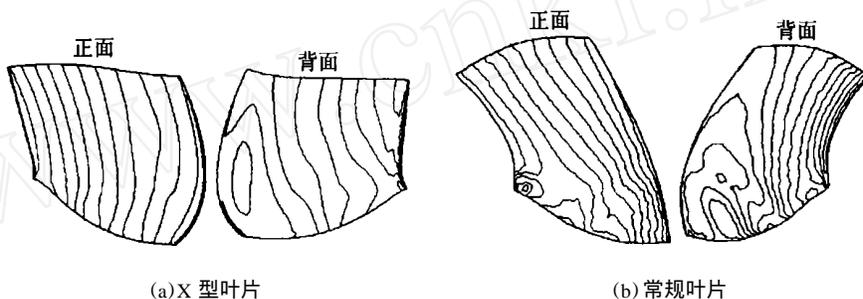


图4 X型叶片与常规叶片正、背面等压线

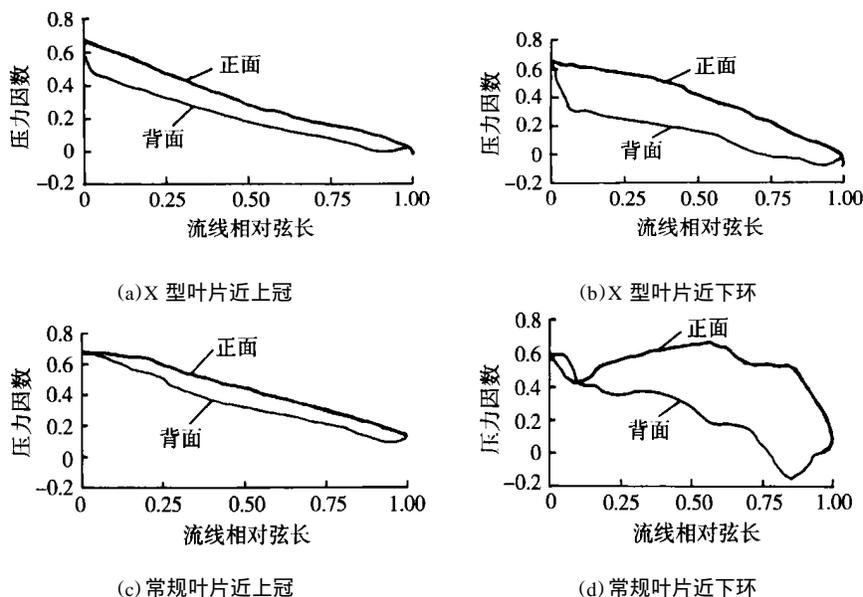


图5 X型叶片与常规叶片在近上冠及近下环翼形上的压力分布

从以上分析来看，X型叶片在提高转轮过流量、改善空化性能等方面是很有潜力的。

2.4 转轮叶片的力特性

由于X型叶片压力分布特点，使其受力趋于合理，这主要体现在2个方面。

1) 混流式转轮叶片和下环一起可看做固定在上冠处的悬臂受力结构。对常规叶片而言，由于负荷趋于向下环集中，使得叶片上合力作用点靠近下环，到叶片上冠根部的力臂较大，从而造成叶片根部应力集中；而X型叶片从上冠到下环负荷分布均匀，合力作用点到叶片上冠根

部的力臂较小, 从而使得叶片根部应力值相对减小。

2) X 型叶片具有外凸的上冠翼形, 相对常规叶片内凹的上冠翼形而言, 叶片根部(上冠处)的受力方式发生了改变, 这也使叶片根部应力从进口到出口分布更加趋于均匀。

3 结 论

X 型叶片的主要结构特点为: 叶片进口具有“负倾角”, 同时, 靠近上冠处翼形为负曲率。为适应能量转换和出口条件的要求, 叶片出水边不在轴面上, 而是一空间曲线。X 型叶片的以上特点, 使其表现出良好的水力性能, 主要体现在以下几方面。

1) 叶片间流道内的流动趋于顺畅, 消除了常规叶片正面常见的“横流”现象, 有利于提高水轮机的运行效率。

2) 转轮内的流动更加均匀, 负荷分布趋于均匀, 减轻了叶片近下环处的负荷集中, 有利于提高转轮的过流量和改善转轮的空化性能。

3) 由于叶片上的受力更加均匀以及叶片上冠的特殊形状, 使得这种叶片的受力趋于合理, 减少了叶片根部的应力集中。使转轮具有较好的受力特性。

以上分析仅限于对能量、空化和受力等特性的理论研究。在此基础上, 进一步进行 X 型叶片进出口几何参数对转轮出口流态以及运行稳定性等方面的影响的研究具有现实意义。

参 考 文 献

- 1 杨健明 水轮机尾水管和转轮中湍流计算研究: [学位论文] 北京: 清华大学, 1999
- 2 Brekke H. Hydraulic design strategy for francis turbine *Hydropower & Dams* Issue, 1996(3): 38~ 42
- 3 周凌九 水轮机转轮流场计算及性能预测: [学位论文] 北京: 中国农业大学, 1999