

液压

准确分析离心泵叶片的应力和应变

作用在离心泵叶轮上的力不仅有流体的压力还有叶轮旋转产生的离心力。为了能够准确说明离心泵叶轮的应力和应变情况，某研发项目组利用数字化的模拟仿真技术对这些作用力进行了模拟试验。

文 | Björn-Christian Will, Andreas Schneider, Martin Böhle

工程师在对泵进行结构设计时需要考虑每一个零部件的受力情况，以实现最佳性能。如果在最初设计中就存在缺陷或不足，那么在使用过程中必然会出现零部件的损坏，严重时会导致整个设备无法正常工作，甚至整条生产线的停工。另一方面，过于保守的设计会

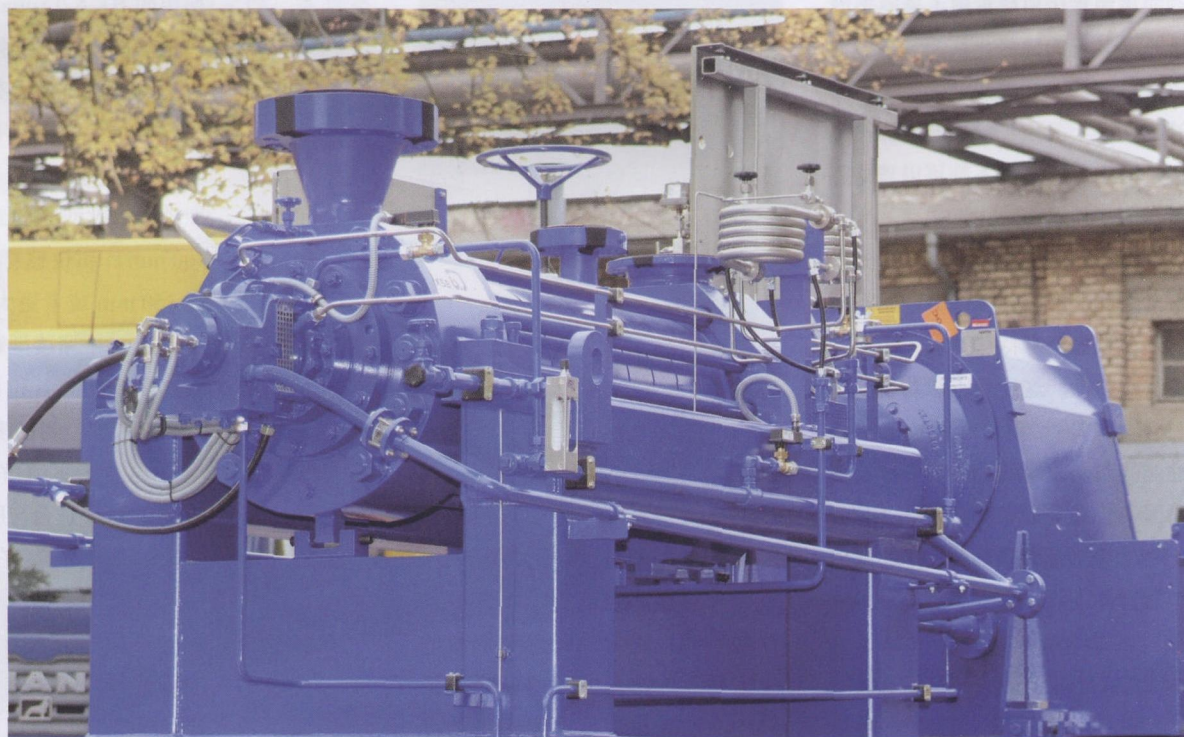
增加用料，从而增加设备成本，降低功率密度(单位重量与功率之比)。

利用 FSI 准确分析叶轮的负载特性

离心泵工作时，其静止的零部件只需承受流体压力的作用，而转动的叶轮还要同时承受由旋转运

动带来的离心力。流体压力与离心力的合成力将带来复杂的应力和应变，而且无法利用简单的力学分析方法来准确描述。为了得到可靠而有力的结论，必须采用计算机支持的模拟仿真工具。这种把流体力学和结构力学结合在一起的计算机模拟仿真技术被称之为 FSI(流体固

图1 试验中的 HG 系列多段式水泵在火力发电厂中被用作离心泵



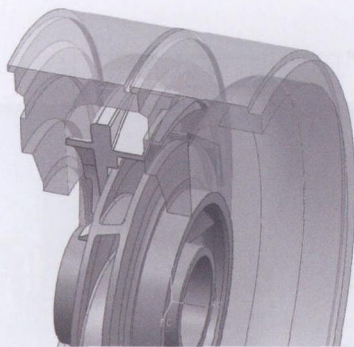


图 2 HG 系列多段式水泵的叶轮

体相互作用力学分析)；能够准确的对离心泵叶轮在流体压力和叶轮旋转离心力复合作用下的应力和应变情况进行分析计算。

本文所介绍的试验的目的是：为多段式水泵的叶轮性能改进提供相关的应力和形变状态的基本数据。试验中使用的叶轮如图 2 所示，其所装配的多段式水泵如图 1 所示，是一种在火力发电厂中使用的 HG 系列多段式水泵。

全段特性曲线范围内的流量模拟

试验在水泵最具代表性的阶段进行，包括连接两个水泵叶轮的导轮以及将流体输送到下一级的反馈装置。在计算叶轮所受压力时，对整个阶段的流量情况进行了模拟，并将模拟结果与这一阶段范围内的特性曲线进行比较。对比结果表明：

模拟结果与特性曲线的重合度极高，这样就可以进一步结合流动状况分析建立起符合实际的流量模型。

下一步就是流体与机械结构的单向耦合。在这一步骤中，假设形变很小，叶轮对流体的反作用就可以忽略不计，从而明显缩短模拟分析的运算时间。这对于测试多种参数对叶轮强度形成的综合影响是非常有意义的。基于这一原因，此后的描述也仅限于不同时刻的 CFD 瞬时计算的、在压力边界条件下的静态 FEM 有限元计算。试验对多项参数进行了测试，其中最重要的影响因素是以下 3 个：泵的工作点、叶片后缘的形状以及叶片与轮毂之间的过渡圆角半径。

叶片和轮毂过渡处的应力集中

离心泵的扬程与输送流量有关，输出的流量小于额度流量时，扬程提高。这就导致泵内压力的提高，证明叶轮受到的应力随之提高的假设是正确的。由应力集中而产生的最大应力总是出现在叶片和轮毂之间的过渡部位。因此，图 3 中无量纲的比较应力表示的是叶片压力侧、吸入侧以及叶片根部前和后等 4 处过渡圆角半径中间的应力比较情况。为了对最佳点的情况进行比较，试

验时选择的泵流量是其工作时允许的最小流量，为额定流量的 30%。

两个工作点的比较数据表明：不仅最大应力有明显变化，而且最大应力的作用点也在变化。除“支撑板 -SS”（SS= 吸入侧，DS= 压力侧）以外，最佳工作点的应力都高于部分负载的工况，初看起来与直观的认识是矛盾的。对这种矛盾结果的一种解释就是：叶轮受到的压力和离心力部分抵消了。然后，就要分析流动结构对应力的影响：尤其是在部分负载的工况下，叶片吸入侧的流体分离对产生的应力是有影响的。图 3 表示出了泵最佳工作点时的所有试验结果。

过渡圆角半径的性质对应力的影响

当叶片后缘的过渡圆角比较“锋利”时，我们将这种后缘称为“无过渡圆角的后缘”。在径向和半轴向叶轮中这种无过渡圆角的后缘是一种能够稍微提高扬程和微量调节扬程的常见措施。为了测定叶片后缘几何形状对叶片应力的影响，试验时使用的叶片既有“后缘无过渡圆角”的叶片，也有“后缘有过渡圆角”的叶片。CFD 计算结果显示：有过渡圆角的功比值增加了约 10%，在应力上也有积极效果，如图 4 所示。

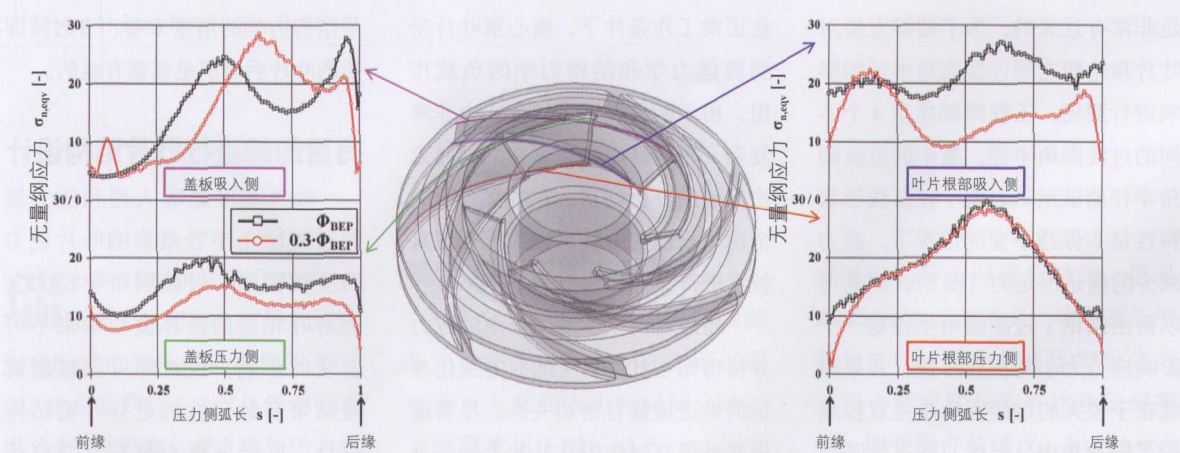


图 3 叶轮工作点对应力的影响

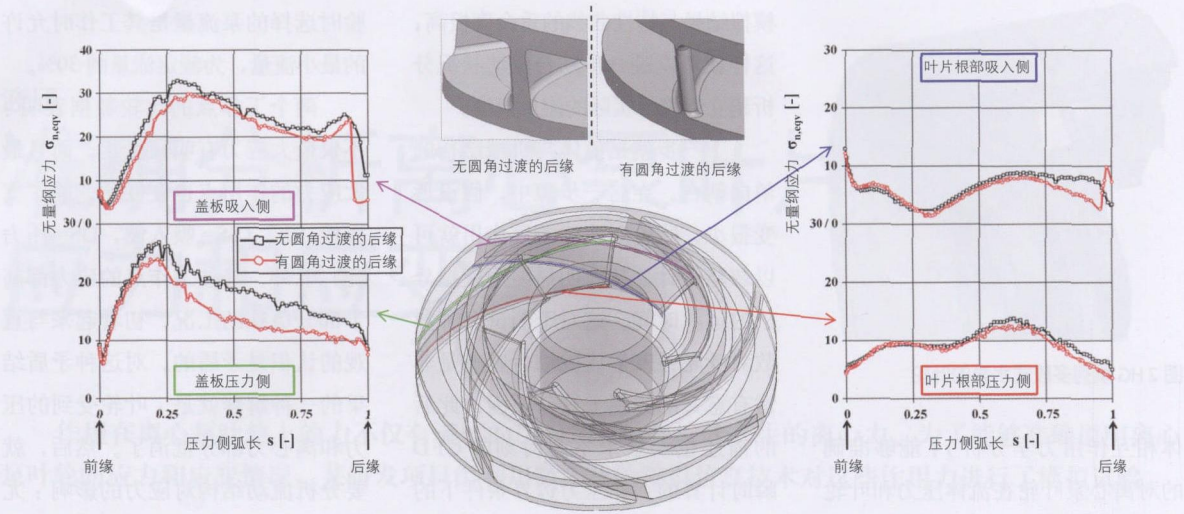


图4 叶片后缘形状对应力的影响

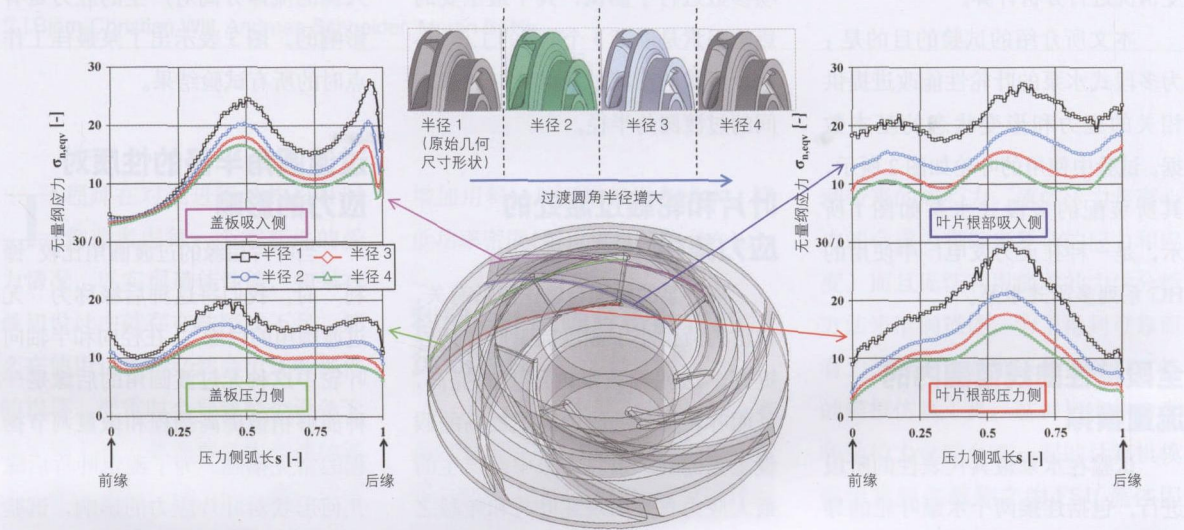


图5 过渡圆角半径对应力的影响

曲线的基本形状保持不变，但应力水平略有下降；尤其是在叶片后缘，应力减少的几乎一样。从流体力学和结构力学的角度来看，这种变化是非常有意义的。为了能够直接对叶片和轮毂之间过渡圆角半径的影响进行测定，工程师制定了4个不同的过渡圆角半径。最小的过渡圆角半径测试结果表明：在曲线形状特性基本保持不变的情况下，应力减少的量是恒定的（图5）。因此可以得出结论：过渡圆角半径是一个影响应力大小的重要参数。其原因就在于较大的过渡圆角半径直接减少了应力集中。当然，若过渡圆角半径太大也会对流动性能带来影响，

因为其减小了有效的流通面积。

数字化模拟下的应力区分析

最后，可以做出这样的小结：在正常工作条件下，离心泵叶片受到流体力学和结构力学的负载作用。由于两种作用力的合成力非常复杂，应力区也非常复杂，因而无法简单的分析计算。在本文介绍的情况下只能借助数字化的模拟仿真技术进行分析计算。

通过对两个不同工作点的应力分析得知：叶片承受的应力变化与泵的输送流量有密切关系。尽管输送流量提高时作用在叶片上的压力提高的较少，但由于压力和离心力

的合力是一个相当复杂的力，因此最大应力还是会有所提高。两个结构性的几何参数也被作为影响因素进行了测试。无论是从流体力学还是结构力学的角度来看，有过渡圆角的叶片后缘都是非常有益的。

有目的的进行叶片结构设计

叶片与叶轮吸入侧和压力侧的过渡圆角半径是影响叶片应力的主要因素；过渡圆角半径太大会对叶轮腔的液体流动带来不可忽视的影响。设计师可以根据试验结果有针对性的进行叶轮结构设计，以保证离心泵在交变载荷作用下的长使用寿命。