工程热物理所压气机旋转失速研究取得进展

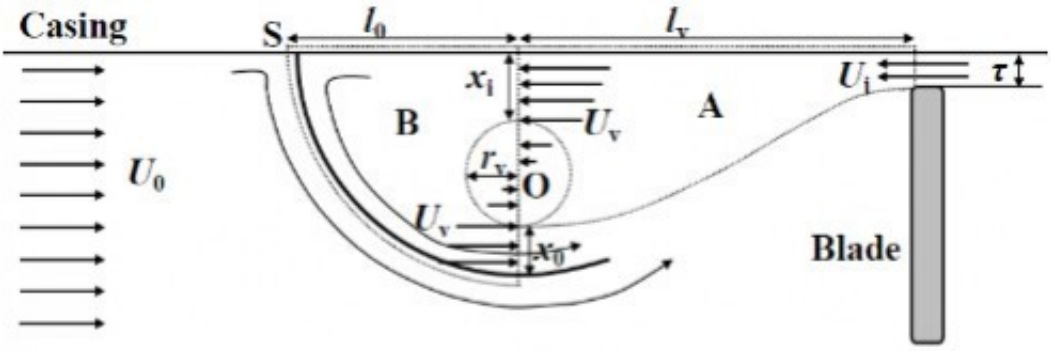

图1 泄漏流与主流作用的控制体模型示意图

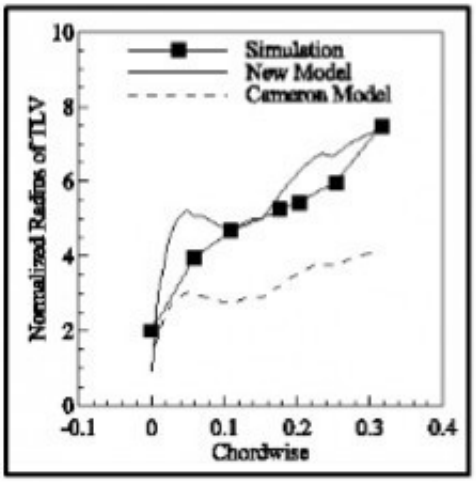

图2 泄漏流作用区域大小的预测结果

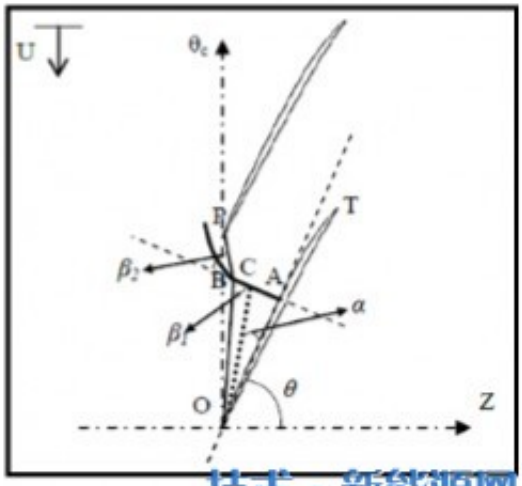

图3 失速临界与交界面位置模型

技术·新能源网 china-nengyuan.com

旋转失速是限制压气机稳定工作范围的关键因素，如何在设计阶段对失速边界进行定量预测一直是设计人员关注的重点问题。失速边界的预测主要有两类方法：一是数值模拟，二是分析模型。前者虽然能够捕捉更多的流场细节，但对计算资源要求高，尤其是非定常数值模拟，对目前的工业应用来说依然耗时太长。后者能够在设计阶段快速预测失速边界，但由于近似假设和经验系数的引入，导致其精度和适用范围有限。在跨音速压气机中，叶尖泄漏流及其与激波的相互作用对叶尖流场起主导作用，以往的研究表明，这种相互作用与压气机的尖峰型失速先兆有着紧密联系。

为了在设计阶段评价叶顶间隙对失速边界的影响，中国科学院工程热物理研究所国家能源风电叶片研发（实验）中心研究人员基于叶尖泄漏流前缘溢出准则发展了一种适用于跨音速压气机的失速边界预测方法。首先通过对某跨音速压气机转子的非定常数值模拟，探究叶尖流场非定常波动与失速先兆的关系。通过分析失速边界点的叶尖流场波动，发现泄漏流与主流的交界面随时间周期性摆动，其频率约为0.5倍的叶片通过频率。叶尖相对总压分布的变化表明，靠近低相对总压区域附近的交界面向上游偏折，交界面随着相对总压分布的周期性变化而振荡；在部分时刻，交界面已经位于叶片前缘上游，也就是说泄漏流从相邻叶片前缘溢出。泄漏流轴向速度的分布和变化趋势与相对总压的分布一致。总结来说，低相对总压引起泄漏流负轴向速度增加，从而导致对应位置的交界面向上游偏折。因此，如何建立泄漏流动量与交界面位置之间的定量关系是建模的关键。

在跨音速压气机中，由于激波的影响，交界面在波前与波后呈现不同的形态。在激波上游交界面近似呈直线分布，而在激波下游交界面向上游偏折，这种变化是由于泄漏流与主流的动量平衡关系发生改变而引起的。在激波上游，泄漏流与主流的作用区域呈三维螺旋涡状结构。在垂直于交界面的方向上，泄漏流与主流来流的动量平衡。为了分析动量交换关系，研究人员将泄漏流与主流的作用简化为如图1所示的控制体模型，其中泄漏流环绕上游泄漏涡并与主流发生动量交换，形成交界面。假设作用区域为无粘不可压缩流动，根据控制体的质量和动量守恒约束可以得到图中作

用区域半径的近似计算关系式。然后将泄漏涡核轨迹的位置与作用区域半径叠加即可得到交界面相对叶片吸力面的位置。

图2对比了研究得到的新模型与其他模型的预测效果。结果表明，新模型能够更好地预测泄漏流与主流作用区域的大小，这是由于在新模型中考虑了上游泄漏涡的累积效果。基于新模型对交界面位置的预测能力，研究人员对失速临界点的交界面进行了建模，如图3所示。在失速临界点，交界面经过激波向上游偏折，刚好经过相邻叶片的前缘。根据图中的几何关系，可以得到临界点泄漏流速度与主流速度之间的关系。当泄漏流速度分布已知时，可以根据本研究中的模型得到主流的速度，从而估计失速边界点的流量系数。另外，如果考虑泄漏流速度分布随时间的波动，还可以根据模型得到主流的速度波动，用以分析近失速工况的非定常流动效果。对比不同间隙大小时的失速边界点的模型预测和数值模拟结果，发现本研究提出的模型能够很好地评估叶间泄漏流对失速边界的影响。由于合理地考虑了激波上游和下游交界面的形态变化，该模型可以捕捉到失速边界点流量系数随间隙大小的非线性变化。

研究提出的模型可以用于设计阶段评价叶顶间隙大小对压气机稳定工作范围的影响，或者作为防失速模块集成到发动机运行控制系统中，保障发动机的安全可靠工作。目前已经完成了建模和设计转速工况下的模型验证工作，正在进行部分转速运行工况时的分析和模型验证，从而将模型的应用拓展至发动机变工况运行中。

部分相关研究成果已经在国际会议ASME Turbo Expo 2016上发表。为了全面评价叶顶间隙的影响，为转子优化设计和叶尖流动控制提供依据，中心研究人员还在针对叶尖泄漏流对损失和压升的影响进行研究。

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/99069.html