

汽轮机轴向排汽系统流场特性研究

金 焯

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘 要】：汽轮机轴向排汽系统在联合循环机组中承担蒸汽动能释放与流动扩散功能，其流场特性直接影响冷端效率与机组运行稳定性。在复杂布置条件及多工况运行下，排汽区域易出现速度分布不均、局部回流及压损偏大等问题。以三菱 M701F4 型“一拖一”双轴布置燃气—蒸汽联合循环发电供热机组为对象，结合中位布置与轴向排汽结构特征，构建排汽流场计算模型，对抽凝与全冷凝工况下流动特性进行对比分析。结果表明，关键区域存在明显流动偏移与涡旋结构，经优化后流场均匀性与排汽效率得到有效提升。

【关键词】：汽轮机；轴向排汽；流场特性；排汽结构；联合循环机组

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.064

引言

汽轮机排汽过程处于蒸汽动力循环的末端阶段，其流动状态对凝汽器换热条件与机组出力具有直接影响。轴向排汽结构因布置紧凑、流动路径短而在中位布置机组中广泛采用，但复杂几何过渡与多方向流动叠加，使内部流场呈现显著非均匀特征。局部速度突变与压力梯度变化容易诱发涡流及回流区，进而增加能量损失并影响排汽稳定性。三菱 M701F4 型“一拖一”双轴布置燃气—蒸汽联合循环发电供热机组单套额定功率 484.22MW，燃机与汽机分轴设置，汽机采用轴向排汽形式，在抽凝与全冷凝两类工况切换过程中，排汽流动结构差异明显。针对该类典型结构开展流场特性分析，有助于明确流动演化规律并为结构优化提供依据。

1 轴向排汽系统结构构型与流动边界条件

1.1 三菱 M701F4 机组排汽结构特征

三菱 M701F4 型“一拖一”双轴布置燃气—蒸汽联合循环发电供热机组，单套额定功率 484.22MW，系统由燃机、燃机发电机、无补燃三压再热脱硝型余热锅炉、汽轮机及汽机发电机等构成，燃机与汽机分轴设置并采用中位布置形式。汽轮机轴向排汽结构与机组整体布置紧密耦合，排汽由末级叶片沿轴向直接进入排汽缸并过渡至凝汽设备，流动路径呈现短程直通特征。侧进气燃机与中位汽机之间的空间布局限制了排汽扩散角度，使流动在进入排汽段后迅速发生截面变化，导致速度分布具有明显轴向集中趋势。结构紧凑性提高了设备集成度，但也增强了局部流动干扰与动能耗散敏感性。

1.2 轴向排汽通道几何构成

三菱 M701F4 型机组汽轮机采用轴向排汽形式，排汽通道由末级叶片出口区、扩散段、排汽缸及连接凝汽器接口构成，各段几何参数直接决定流场演化方式。末级出口截面较小且流速较高，进入扩散段后通道截面逐渐增大，但扩张角度受结构空间限制难以完全匹配理想扩散条件，易形成流动分离区域。排汽缸内部存在非对称结构特征，受设备布置及连接方式影

响，流动路径呈现偏转与再分布过程^[1]。通道表面曲率变化与局部构件布置共同作用，使蒸汽在扩散过程中产生速度梯度与剪切效应，对整体流场均匀性形成约束。

1.3 抽凝与全冷凝工况流动边界

三菱 M701F4 型机组在供热运行条件下采用抽凝运行方式，部分蒸汽在中间级抽出用于供热，进入排汽段的蒸汽流量及压力参数相对降低，排汽流动呈现低密度、低动能特征，流场稳定性受抽汽比例影响显著。在非供热运行状态下，汽轮机处于全冷凝工况，全部蒸汽进入轴向排汽系统，流量增大且末级排汽湿度上升，流动惯性增强并加剧扩散段内压力恢复过程的不均匀性。不同工况下边界条件在流量、温度及压力方面存在显著差异，使排汽系统内部流动呈现多模式变化特征，对流场结构与能量损失分布产生直接影响。

2 轴向排汽流场空间分布特征解析

2.1 排汽速度场分布规律

三菱 M701F4 型“一拖一”双轴布置燃气—蒸汽联合循环发电供热机组单套额定功率 484.22MW，燃机与汽机分轴设置并采用中位布置形式，汽轮机轴向排汽使蒸汽由末级沿轴线方向高速排出。排汽初始区域速度梯度显著，中心区保持较高流速，而近壁区域受黏性作用与几何约束影响形成低速带，径向速度分布呈现明显不均特征。进入扩散段后，流体受截面扩张作用产生减速效应，但局部区域因扩张角度偏大而出现速度突降与分离倾向，导致速度场出现多尺度波动结构。不同运行工况下流量变化进一步强化轴向与径向耦合，使速度分布呈现动态非均匀特征。

2.2 压力场梯度变化特征

三菱 M701F4 型机组轴向排汽系统中，压力场分布受流动减速与扩散过程共同控制，末级出口处压力水平较低，进入排汽通道后逐渐回升。扩散段内压力恢复过程存在明显梯度差异，轴向方向呈连续递增趋势，而径向方向因速度分布不均形成局部高低压交替区域^[2]。通道结构变化与流动分离现象叠加，

使部分区域出现压力恢复滞后甚至局部回落现象,影响整体降压分布。抽凝与全冷凝两类工况下蒸汽密度与流量差异显著,导致压力场梯度幅值与分布范围发生变化,形成具有工况敏感性的压力场特征结构。

2.3 流线结构与主流路径演化

三菱 M701F4 型机组汽轮机轴向排汽过程中,流线结构在几何扩展与流动惯性共同作用下不断演化,主流路径沿轴向方向延伸并在扩散段内逐步展开。流体在进入排汽缸后受到通道形态影响产生偏转,部分流线偏离主流区域形成次级流动结构,局部区域出现旋涡与回流区,改变整体流动拓扑关系。主流路径在不同截面上表现出明显的再分配特征,中心流与边界流之间存在能量交换过程,强化了流场非均匀性。工况变化对流线分布具有调制作用,使主流路径在不同负荷条件下呈现差异化演变规律。

3 非均匀流动与局部回流形成机理分析

3.1 几何突变引发的流动分离

三菱 M701F4 型“一拖一”双轴布置燃气—蒸汽联合循环发电供热机组单套额定功率 484.22MW,燃机与汽机分轴设置且汽机采用中位布置与轴向排汽形式,排汽通道在末级出口与扩散段之间存在明显几何突变。截面由相对收缩状态快速过渡至扩张结构,流体在惯性作用下难以及时贴附壁面,近壁层动量迅速衰减,导致边界层分离并形成低速滞留区。几何曲率变化与局部构件干扰叠加,使分离区沿周向呈非对称分布,进一步破坏轴向主流的连续性。分离区内部流体更新能力较弱,易诱发局部压力波动与附加能量损失,对排汽流场稳定性形成持续影响。

3.2 多方向汇流导致的偏流效应

三菱 M701F4 型机组在复杂设备布置条件下,轴向排汽流动不仅包含末级蒸汽主流,还叠加来自不同空间区域的次级流动,形成多方向汇流格局。蒸汽在进入排汽缸过程中受到结构非对称性影响,各区域流量分配不均,局部流动动量存在差异,导致主流路径发生偏移。侧向空间约束使部分流体向一侧集中,形成偏流带并压缩对侧流动通道,引起速度与压力分布进一步失衡^[3]。偏流效应沿轴向传播并在扩散段内放大,使流场呈现明显非对称结构,对后续扩散效率与压力恢复过程产生不利影响,增加排汽系统整体流动阻力。

3.3 扩散过程中的涡旋结构生成机制

三菱 M701F4 型机组轴向排汽系统在扩散过程中,蒸汽流动由高速向低速过渡,动能向静压转化过程中伴随强烈剪切效应。速度梯度在径向与周向方向上的不均匀分布,使局部区域产生旋转动量,形成初始涡核结构。扩散角度与流动分离共同作用,促使涡旋在排汽缸内部发展并相互耦合,形成复杂涡系。部分涡旋沿壁面发展与主流相互作用,造成能量再分配与动

量交换过程增强,导致流场结构更加紊乱。不同工况下流量与湿度变化对涡旋强度具有调制作用,使涡旋结构呈现明显的时空演化特征,进一步加剧局部回流与能量耗散现象。

4 排汽流动优化控制与结构调整方法

4.1 排汽通道渐扩结构优化路径

三菱 M701F4 型“一拖一”双轴布置燃气—蒸汽联合循环发电供热机组单套额定功率 484.22MW,燃机与汽机分轴设置并采用中位布置形式,汽轮机轴向排汽通道承担高速蒸汽向低速扩散转化的关键功能。排汽通道渐扩结构优化需以控制流动分离与强化压力恢复为核心,通过合理调整扩散段轴向长度与截面变化速率,使流体减速过程保持连续性,避免局部突扩引起边界层脱附。渐扩角度需依据流体雷诺数及湿蒸汽特性进行匹配,使流动在扩散过程中维持附着状态并降低剪切损失。通道断面形状应由单一规则形态向多曲率复合结构转变,通过曲率连续过渡削弱流动突变带来的不稳定因素。结合精细化数值模拟,对不同截面位置的速度分布与压力恢复效率进行反演分析,实现结构参数与流动特性之间的耦合优化。针对抽凝与全冷凝工况差异,需构建可兼顾多工况适应性的渐扩结构,使不同流量条件下均能够维持较高流场均匀性与较低附加压降,从而提升排汽系统整体运行效率。

4.2 导流构件对流场重构作用

三菱 M701F4 型机组轴向排汽系统中,导流构件作为流动调控的重要手段,对改善非均匀流动结构具有关键作用。通过在排汽通道关键区域布置导流板或导流环结构,可对蒸汽流向进行有效引导,使主流路径趋于轴向集中并削弱侧向偏流趋势。导流构件的布置位置需结合流场分布特征进行优化,使其处于流动分离与涡旋易发区域,实现对不稳定流动结构的主动干预。导流表面曲率与倾角设计应满足流动附着条件,通过降低局部速度梯度与剪切强度,减缓涡旋生成与发展过程。多级导流结构可形成分段调控效果,使流体在不同截面逐步完成流向修正与能量再分配^[4]。结合数字化设计理念,通过流场可视化分析对导流构件形态进行迭代优化,使导流效果与压降控制之间达到动态平衡。导流构件与原有排汽结构形成协同作用后,可显著改善流场对称性并提升整体排汽稳定性。

4.3 关键区域流动均衡调控措施

三菱 M701F4 型机组轴向排汽过程中,关键区域主要集中于末级出口、扩散段入口及排汽缸内部空间,这些区域流动特性直接决定整体流场均匀程度。流动均衡调控需从流量分配与动量协调两个层面展开,通过优化局部通道阻力分布,实现各区域流量的动态均衡。针对高流速集中区域,应通过结构调整降低局部流动强度,使动量沿径向逐步扩散,避免形成冲击式流动结构;针对低速滞留区域,应增强流体更新能力,减少滞流区范围并促进能量交换。排汽缸内部空间需进行流动再组织

设计,通过改善空间利用率与流动路径连续性,使蒸汽在扩散过程中形成稳定的主流结构。结合多工况运行特征,对不同负荷条件下的流动变化进行动态调控,使流场在抽凝与全冷凝状态下均保持较高均匀性。通过构建参数化调控模型,实现关键区域流动状态的精准控制,从而降低局部回流强度并提升排汽系统整体运行品质。

5 优化后流场特性与排汽性能提升分析

5.1 流场均匀性变化对比

三菱 M701F4 型“一拖一”双轴布置燃气—蒸汽联合循环发电供热机组单套额定功率 484.22MW,燃机与汽机分轴设置且汽机中位布置并采用轴向排汽结构,经结构优化与流动调控后,排汽通道内速度与压力分布呈现明显均衡趋势。原有轴向集中与周向偏移现象得到抑制,径向速度梯度减缓,主流区域与近壁区域之间的动量差异显著缩小。扩散段内流动附着程度提高,局部分离区范围收缩,使流场整体连续性增强。不同截面流速分布由离散状态向平滑过渡演变,流线结构更加稳定,减少了局部高剪切区域的形成。抽凝与全冷凝工况下流场响应趋于一致,流动分布的可预测性提高,表明排汽系统内部流动结构已由非均匀状态向协调分布转变。

5.2 压降与能量损失改善情况

三菱 M701F4 型机组轴向排汽系统在优化后,通道内压降分布更加均匀,扩散过程中的能量转化效率得到提升。原有因

流动分离与涡旋结构引起的附加压降明显降低,局部高阻区逐步消除,使整体压力恢复过程更加连续。蒸汽在扩散段中的动能衰减路径得到优化,剪切损失与紊流耗散强度减弱,能量损失分布由集中型向分散型转变。排汽末端压力波动幅度降低,减轻了对凝汽设备运行的扰动影响^[5]。不同工况下压降变化趋势更加平缓,系统对流量波动的适应能力增强,排汽过程中的能量利用水平得到有效提升。

5.3 排汽稳定性与工况适应能力提升

三菱 M701F4 型机组在结构优化与流动调控措施实施后,轴向排汽系统运行稳定性显著增强,流场波动幅度明显降低。排汽过程中主流路径保持连续,回流与涡旋干扰得到有效控制,使流动状态更加平稳。抽凝运行条件下,流量减少带来的流场波动被有效抑制,低负荷状态下仍能维持稳定排汽结构;全冷凝工况下,大流量蒸汽进入排汽通道后未出现明显偏流放大现象,流动适应能力得到提升。排汽系统对不同运行工况的响应更加灵敏且可控,流场结构变化趋于有序,保障了机组在复杂运行条件下的稳定输出与持续运行能力。

6 结语

轴向排汽系统流场特性直接关联机组冷端效率与运行品质,通过对速度、压力及流线结构的系统分析,可明确非均匀流动与能量损失的内在联系。结构优化与流动调控协同作用下,流场分布趋于均衡,压降水平得到有效控制,排汽过程稳定性显著增强,为高效运行与多工况适配提供可靠支撑。

参考文献:

- [1] 许涛,徐万兵,黄辉,等.汽轮机汽门严密性试验导致的窜轴事故分析[J].节能技术,2025,43(6):560-563.
- [2] 肖晨宇,邱爽.联合循环机组分轴轴向排汽汽轮机冷态启动振动优化[J].企业管理,2023,(S2):104-105.
- [3] 颜廷选.轴向排汽汽轮机中低压汽缸稳定性数值模拟研究[J].汽轮机技术,2023,65(6):435-437.
- [4] 万勇.浅析某电厂轴向排汽机型汽轮机技术[J].机电信息,2023,(14):85-88.
- [5] 刘彦鑫.生物质电厂轴向排汽式汽轮机疏水系统设计研究[J].广东化工,2022,49(7):173-174+183.