

多级汽轮机非平衡态凝结模型的流动特性与湿度分布研究

钱勇¹, 周祚弘², 邱健¹, 陈阳¹, 李志刚², 李军²

(1. 东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000; 2. 西安交通大学叶轮机械研究所, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了探究平衡态凝结与非平衡态凝结对汽轮机内部流动特征、湿度分布以及整机性能的影响, 以某型十五级透平叶栅汽轮机为研究对象, 针对在不同运行负荷下的汽轮机整机叶栅流动开展了平衡态与非平衡态的数值分析对比研究。研究结果表明: 在不同运行负荷下, 非平衡态凝结模型获得的整机性能略低于平衡态凝结模型的计算结果, 但二者并没有显著差异; 相较于平衡态凝结, 非平衡态凝结中蒸汽工质首次出现凝结的位置更接近汽轮机出口的低压级叶栅。

关键词: 汽轮机; 非平衡态凝结; 平衡态凝结; 数值研究

中图分类号: TK262 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.04.012

[引用本文格式] 钱勇, 周祚弘, 邱健, 等. 多级汽轮机非平衡态凝结模型的流动特性与湿度分布研究[J]. 热能动力工程, 2025, 40(4): 104-114. QIAN Yong, ZHOU Zuohong, QIU Jian, et al. Investigations on flow characteristics and humidity distribution of non-equilibrium condensation model in multi-stage steam turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(4): 104-114.

Investigations on Flow Characteristics and Humidity Distribution of Non-equilibrium Condensation Model in Multi-stage Steam Turbine

QIAN Yong¹, ZHOU Zuohong², QIU Jian¹, CHEN Yang¹, LI Zhigang², LI Jun²

(1. Dongfang Steam Turbine Co., Ltd., Deyang, China, Post Code: 618000;

2. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)

Abstract: In order to investigate the effects of equilibrium condensation and non-equilibrium condensation on the flow characteristics and humidity distribution of steam turbine and the whole turbine performance, the numerical analysis and comparative research of equilibrium and non-equilibrium flow of the whole turbine cascade for a 15-stage steam turbine were carried out at different operating loads. The results show that the whole turbine performance of the non-equilibrium condensation model is slightly lower than that of the equilibrium condensation model at different operating loads, but there is no significant difference between them. In addition, compared with equilibrium condensation, the position where the working medium condenses for the first time in non-equilibrium condensation is closer to the low-pressure stage cascade at the outlet of steam turbine.

Key words: steam turbine, non-equilibrium condensation, equilibrium condensation, numerical research

引言

随着现代汽轮机技术的快速发展, 汽轮机内部叶栅通道的湿蒸汽流动与凝结问题受到了广泛关注。湿蒸汽在汽轮机中的凝结与流动对末级叶片造

成了严重的水蚀损害和湿汽损失, 而且在深入调峰运行工况下, 汽轮机低压缸末级叶片的工作条件进一步恶化^[1-2], 因此深入研究汽轮机内部湿蒸汽的凝结特性并评估整机性能具有重要意义。

早期针对汽轮机内部湿蒸汽凝结特性的研究主要基于平衡态凝结模型开展, 即蒸汽透平中的凝结

过程在蒸汽膨胀到干饱和线时立即发生。然而在真实透平中,过热蒸汽膨胀到干饱和线时不会立即凝结,而是继续膨胀至过饱和状态,一直达到过饱和极限点(Wilson点)时才会出现自发凝结,形成大量的凝结水滴^[3-4],这一过程被称为非平衡态凝结过程。随后,叶栅通道内的蒸汽在凝结放热的作用下逐渐恢复至热力学平衡状态。在非平衡态凝结模型的基础上,彭姝璇等人^[5]引入了表面张力修正系数以提高非平衡态凝结预测的精度。吴涛等人^[6]对比分析了非平衡凝结原型、修正模型及平衡凝结流动模型三维叶栅计算结果,发现采用非平衡态模型的仿真结果更接近实际凝结级内的流动情况。王智等人^[7]综合考虑了自发凝结与非均质凝结对汽轮机内部湿蒸汽凝结特性的影响,指出实际汽轮机内的杂质会显著干扰蒸汽的自发凝结现象,改变叶栅中流场的压力分布,降低过冷度,使流动更接近平衡态。随后,王智等人^[8]还探究了粘性流动引起的边界层分离对自发凝结的影响,结果表明,凝结增强了边界层的分离程度,从而导致更大的流动损失。巫志华等人^[9-10]在完全欧拉坐标系下数值模拟了湿蒸汽两相自发凝结的流动过程,结果表明,自发凝结过程改变了汽轮机叶片表面的压力分布和气流角分布,进而影响了汽轮机的整机性能。张宇等人^[11]在非平衡态凝结的数值计算中引入双流体模型,能够更准确地描述单级汽轮机叶栅通道内的非平衡凝结流动。为了获取更高的非平衡态凝结预测精度,朱晓峰等人^[12]发展了欧拉-欧拉框架下的非平衡态凝结计算方法,张冬阳^[13]进行了非平衡态湿蒸汽流动快速准确数值模拟方法(FAWS)的研究。杨建道等人^[14]则数值研究了某核电机组低压缸内的凝结流动,指出与平衡态凝结相比,非平衡态凝结模型计算的低压缸各参数均有明显变化。

为了准确评估汽轮机内部蒸汽凝结引起的湿汽损失并设计安全可靠的末级叶片^[15],研究人员开展了大量研究。高德伟^[16]探究了汽轮机末级叶片的水蚀特征,强调湿汽损失由一次水滴损失与二次水滴损失组成。Starzmann等人^[17-18]将湿汽损失分为热力学损失、水滴阻力损失和制动损失,其中热力学损失占整个湿汽损失的主要部分,并提出了基于平衡相变模型、熵增以及卡诺循环的热力学损失计算方法。韩中合等人^[19]主张将湿汽损失分为热力学损失、水滴阻力损失、制动损失、疏水损失、离心损失和出口损失。而在湿汽损失计算方面,Gyarmathy^[20]

首先提出采用一维方法计算湿汽损失;Laali等人^[21]进一步发展了湿汽损失各部分的定量计算方法;李瑜等人^[22]通过Fortran语言开发了湿汽损失的定量计算程序,能够获得各湿蒸汽级中的多种损失信息;余兴刚^[23]则在非平衡态凝结模型的基础上提出了一种计算汽轮机内湿汽损失的三维方法;Wroblewski等人^[24]采用欧拉-欧拉方法发展了类似的三维流动模型;Young等人^[25]基于拉格朗日粒子追踪模型提出了评估透平叶栅通道内部水滴沉积的准三维方法;李亮等人^[26]采用响应面优化策略,在综合考虑湿蒸汽透平的气动损失与湿汽损失影响的基础上对低压缸末级透平进行优化,结果表明,优化透平级静叶沿叶高的分布特征能够显著降低湿汽损失并改善透平级的气动性能。

上述汽轮机内部凝结流动的研究对象主要集中于一维喷管和单级叶栅,针对多级汽轮机湿蒸汽凝结特性与湿度分布仍缺乏深入研究。本文以某型十五级汽轮机为研究对象,采用平衡态凝结模型与非平衡态凝结模型,对比分析了汽轮机整机叶栅流动特征以及十五级汽轮机的整机性能。

1 数值方法和计算模型

1.1 数值方法

在使用水和水蒸气作为工质进行数值计算时,为确保Navier-Stokes控制方程封闭性,必须给出水和水蒸气状态参数的定量关系。由于对水和水蒸气性质的精确计算不能简单地利用理想气体模型来处理,但通过维里型状态方程进行两相凝结流动的计算也会产生较大的误差,因此本文采用CFX软件内置的基于IAPWS-IF 97国际标准的真实水蒸气性质模型进行平衡态凝结与非平衡态凝结的数值计算。在进行非平衡态凝结流动计算时,IAPWS-IF 97模型能够调用亚稳态区的过冷蒸汽和过热水的性质,从而适用于非平衡态凝结流动的计算。

水蒸气的平衡态凝结模型是一种考虑了相变的单相模型,其控制方程如下所示:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_M \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho h^*)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h^*) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i \tau_{ij}) + S_E \tag{3}$$

式中： ρ —流体密度； p —压力； T —流体温度； t —时间； u_i 和 u_j —流体在空间 x, y, z 方向上的速度分量； x_i 与 x_j —空间 x, y, z 方向的位置； S_M 和 S_E —动量方程和能量方程的源项； τ —剪切应力张量； h^* —平均总焓。

非平衡态凝结模型控制方程分为液相与汽相，其中汽相控制方程为：

$$\frac{\partial \rho_c r_c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_c u_i r_c) = - (S_d + m_d^* r_c J_d) \quad (4)$$
$$\frac{\partial \rho_c r_c h_c^*}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_c u_i r_c h_c^*) = - r_c \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma_i r_c \frac{\partial T_c}{\partial x_i}) + S_H \quad (5)$$

液相控制方程为：

$$\frac{\partial \rho_d r_d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_d u_i r_d) = S_d + m_d^* r_c J_d \quad (6)$$
$$\frac{\partial \rho_d r_d h_d^*}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_d u_i r_d h_d^*) = - r_d \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma_i r_d \frac{\partial T_d}{\partial x_i}) + S_H \quad (7)$$
$$\frac{\partial \rho_d N_d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_d u_i N_d) = \rho_d r_c J_d \quad (8)$$

$$T_d = T_s(p) - T_{sc} \frac{R_d^*}{R_d} \quad (9)$$

式中：下标 c 和 d 分别表示汽相和水滴； r_c 和 r_d —汽相和水滴的体积分； h_c^* 和 h_d^* —水滴和液相的总焓； Γ_i —涡扩散系数； m_d^* —成核的水滴质量； T_c 和

T_d —汽相和水滴温度； S_d —水滴表面质量输运项； S_H —传热项； N_d —凝结的水滴数； T_s 和 T_{sc} —饱和温度和汽相的过冷度； R_d —水滴半径； R_d^* —形成水滴时的临界半径； J_d —水滴的成核率。

本文通过采用 ANSYS-CFX 19.0 数值求解上述方程来研究十五级汽轮机的整机性能与湿度分布，工质为基于 IAPWS IF97 工业标准的真实水蒸气模型 Steam 5vl。在湍流求解和传热计算方面，采用 SST $k-\omega$ 两方程模型为湍流模型，该模型对于存在流动分离的流场计算具有良好的适应性和收敛性。传热计算选用了 Total Energy 方法，同时还考虑了流体的粘性热效应。此外，计算中还纳入了高速壁面可压缩传热模型，以获得更精准的壁面绝热温度分布。

1.2 计算模型与网格划分

在稳态工况下，汽轮机同一级叶栅通道内各叶片通道流场结构相似，为了提高计算效率，针对各级叶栅通道仅选取了单个流道进行研究，并忽略动叶叶顶间隙对流场的影响，建立了汽轮机单边十五级叶栅单通道流场的计算模型。为了保证数值计算的收敛性与稳定性，在末级动叶出口处将流道进行了延长。图 1 给出了汽轮机单通道流场的子午面和三维模型示意图。图中 S1 ~ S15 为 1 ~ 15 级静叶，R1 ~ R15 为 1 ~ 15 级动叶。

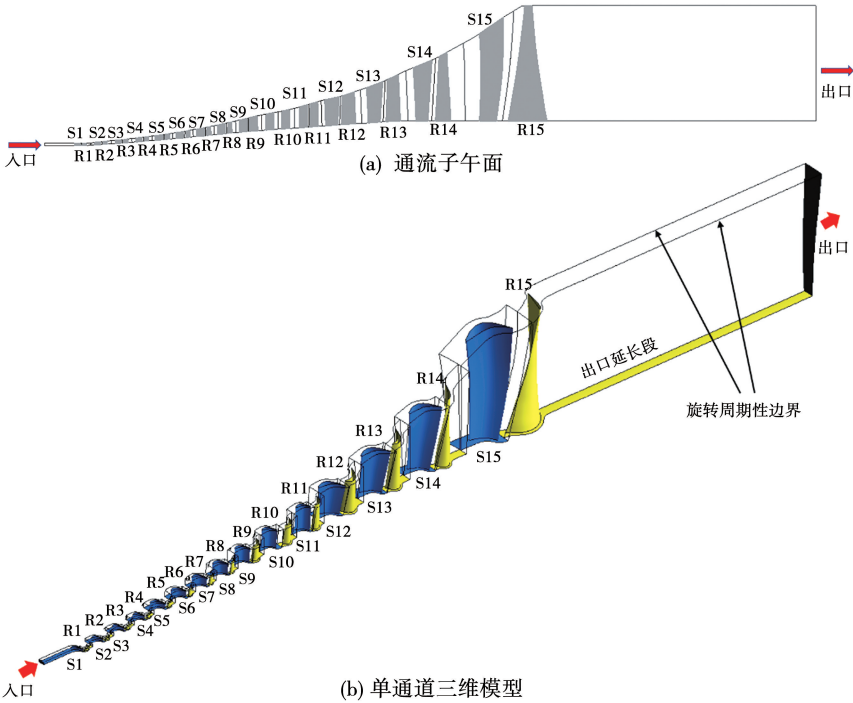


图 1 十五级汽轮机单通道流场计算模型

Fig. 1 Computational models of single path flow field of a 15-stage steam turbine

本文采用 NUMECA 13.1 软件中的 IGG-AutoGrid5 模块,基于 H-O-H 拓扑结构,生成了汽轮机十五级叶栅单通道流场的计算网格。为了适应叶片的复杂几何外形,采用块剖分结构化网格对计算域进行网格生成。其中,在叶片近壁面区域采用了 O 型网格剖分,以提高了叶片前缘和尾缘的网格质量;在叶栅通道和主流区域则采用了 H 型网格剖分,在提高流道中部区域网格质量的同时能够有效减少网格数量。此外,为了准确捕捉流场中复杂的三维流动结构,对近壁面区域的计算网格采取了加密处理,近壁面第一层网格厚度设定为 0.01 mm。在生成计算网格时,基于软件程序设置了 100 步光顺迭代过程,并选定 Fine 级网格质量,确保生成的三维计算网格内相邻网格之间尺寸过渡均匀。图 2 展示了十五级透平叶栅汽轮机数值模型的三维计算网格,表 1 给出了汽轮机单通道流场各级叶栅通道的网格数分布。文献[27]计算模型的叶片直径与本文后 6 级动叶相似,依据其网格无关性验证结果,最终确认汽轮机十五级叶栅单通道流场的计算网格总数为 1 760 万。

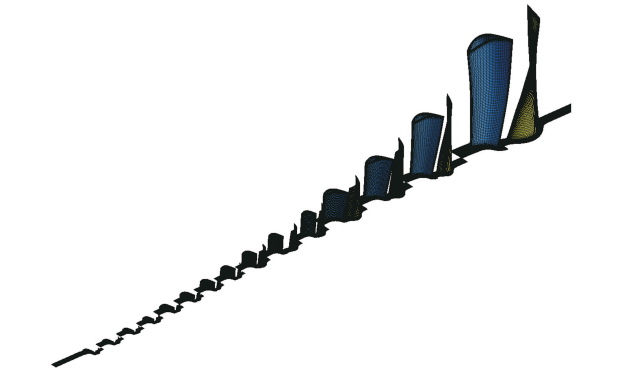


图 2 十五级透平叶栅汽轮机单通道计算网格
Fig.2 Computational grid of single path of a 15-stage steam turbine cascades

表 1 汽轮机单通道流场各级叶栅单通道
计算网格数分布

Tab.1 Computational grid number distribution of each stage cascade in single path flow field of steam turbine

叶片	网格数/万	叶片	网格数/万
S1	60	R1	25
S2	28	R2	33
S3	37	R3	36
S4	40	R4	34
S5	44	R5	44

续表 1

叶片	网格数/万	叶片	网格数/万
S6	48	R6	48
S7	52	R7	62
S8	55	R8	52
S9	56	R9	50
S10	61	R10	59
S11	57	R11	57
S12	81	R12	58
S13	62	R13	125
S14	61	R14	61
S15	75	R15	196

1.3 数值边界条件

在十五级透平叶栅汽轮机数值模拟计算的边界条件设定中,汽轮机入口给定总压、总温以及速度方向,额定工况下汽轮机第一级静叶入口总压为 3.45 MPa,总温为 299 ℃,排汽出口给定平均静压出口,排汽压力为 0.007 5 MPa。其中,汽轮机进口速度方向为轴向,且由入口流向排汽出口。此外,考虑运行负荷改变对汽轮机性能的影响,本文通过调整汽轮机入口总压和总温设定了 5 种研究工况,对 100%,75%,50%,30% 和 15% 运行负荷下的汽轮机各参数进行比较。5 种运行工况参数如表 2 所示。

表 2 各工况数值边界条件

Tab.2 Computational boundary condition under each operating condition

运行工况	入口总压/MPa	入口总温/℃	负荷比例/%
1	3.45	299	100
2	2.64	288.7	75
3	1.87	278	50
4	1.20	235	30
5	0.72	261.2	15

2 结果分析与讨论

2.1 平衡态凝结与非平衡态凝结模型流动特性对比

图 3 展示了不同运行负荷下两种凝结模型在周期性平面的相对速度矢量分布。

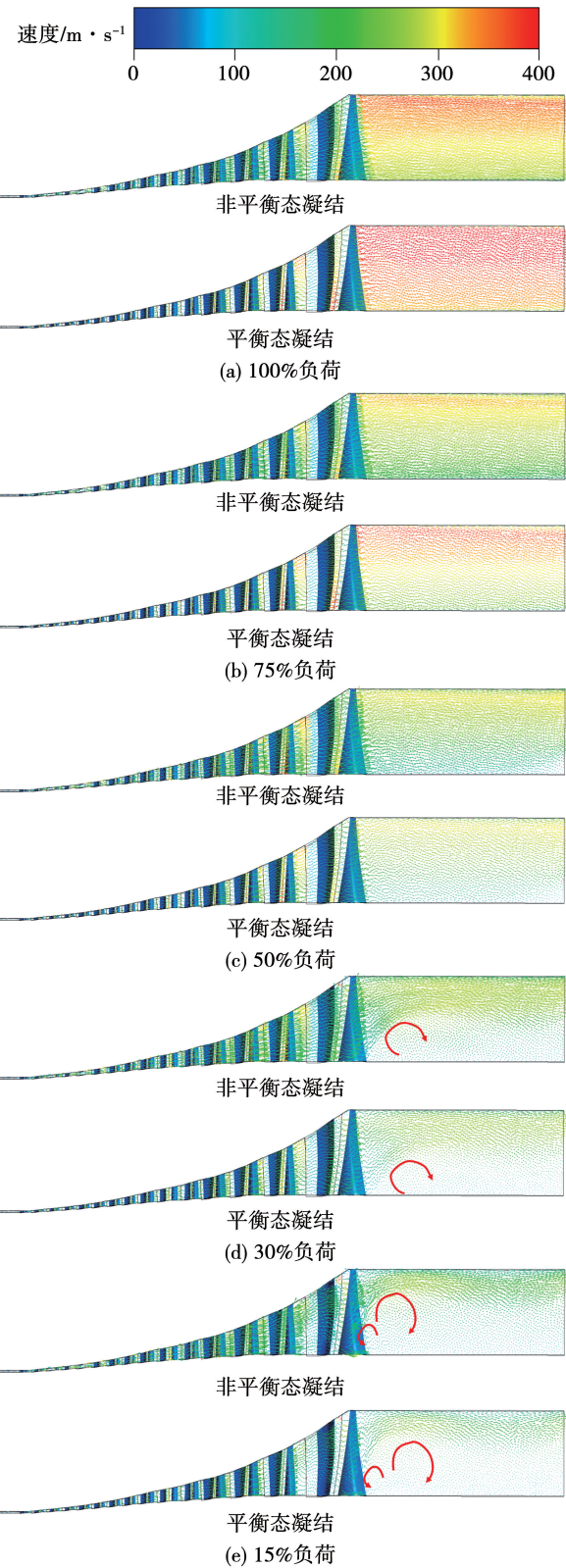


图3 不同运行负荷下两种凝结模型在周期性平面的相对速度矢量分布

Fig.3 Relative velocity vector distributions on the periodic plane of two condensing models at different operating loads

可以发现,在不同的凝结模型下汽轮机内的流动特征较为相似。在 100% 负荷的额定工况、75% 负荷乃至 50% 负荷工况下,汽轮机内的流场分布较为均匀,未出现汽流分离和出口回流现象。当运行负荷降低至 30%,在汽轮机排汽出口处出现了较小范围的出口回流现象。当负荷继续降低至额定工况的 15% 时,在末级静叶与动叶的叶根处开始出现汽流分离现象。同时,随着运行负荷的持续降低,汽流分离区逐渐扩大,排汽出口处的出口回流现象也逐渐显著。当运行负荷降至额定工况的 30% 时,汽轮机排汽出口靠近叶根区域已出现大范围回流,回流面积接近排汽出口面积的 50%。当运行负荷降低至额定工况的 15% 时,末级透平级的叶栅通道内出现了汽流分离现象,尤其是在末级动叶根部以及动静间隙根部最为明显。需要指出的是,平衡态凝结模型下的流动速度明显大于非平衡态凝结模型,这是由于在汽轮机湿蒸汽级存在汽相凝结,导致非平衡态凝结流动的汽相损失了部分动量,导致其流动速度下降。

为进一步对比多级汽轮机在不同凝结模型下的流动特征,图 4 展示了单通道流场末五级中叶展截面相对速度矢量分布。可以看到,平衡态凝结模型与非平衡态凝结模型表现出相同的流线分布。在 100% 的额定运行负荷下,第 12 级、13 级和末级透平级的叶栅通道内均形成了局部涡流,同时在末级叶栅通道的动叶入口出现负攻角。当负荷下降至 75% 时,叶栅通道内的流动特征没有显著变化。当负荷降低至额定工况的 50% 时,随着汽轮机通流流量的持续降低,第 12 到第 15 级动叶叶栅通道内的局部涡流特征进一步加剧,表现为涡流强度增强和尺度扩大。当运行负荷降低至额定工况的 30% 时,末级静叶叶栅通道内形成了强大的局部涡流,占据了大部分叶栅通流面积,同时末级动叶的局部涡流尺度也进一步扩大,并伴随着更大的动叶入口负攻角。在最小的 15% 负荷工况下,末级静叶与动叶叶栅通道几乎完全被局部涡流占据,叶栅通道内的蒸汽流动几乎停滞。值得注意的是,相较于平衡态凝结模型,非平衡态凝结模型下流速下降,导致其叶展截面分离涡的影响范围变小。

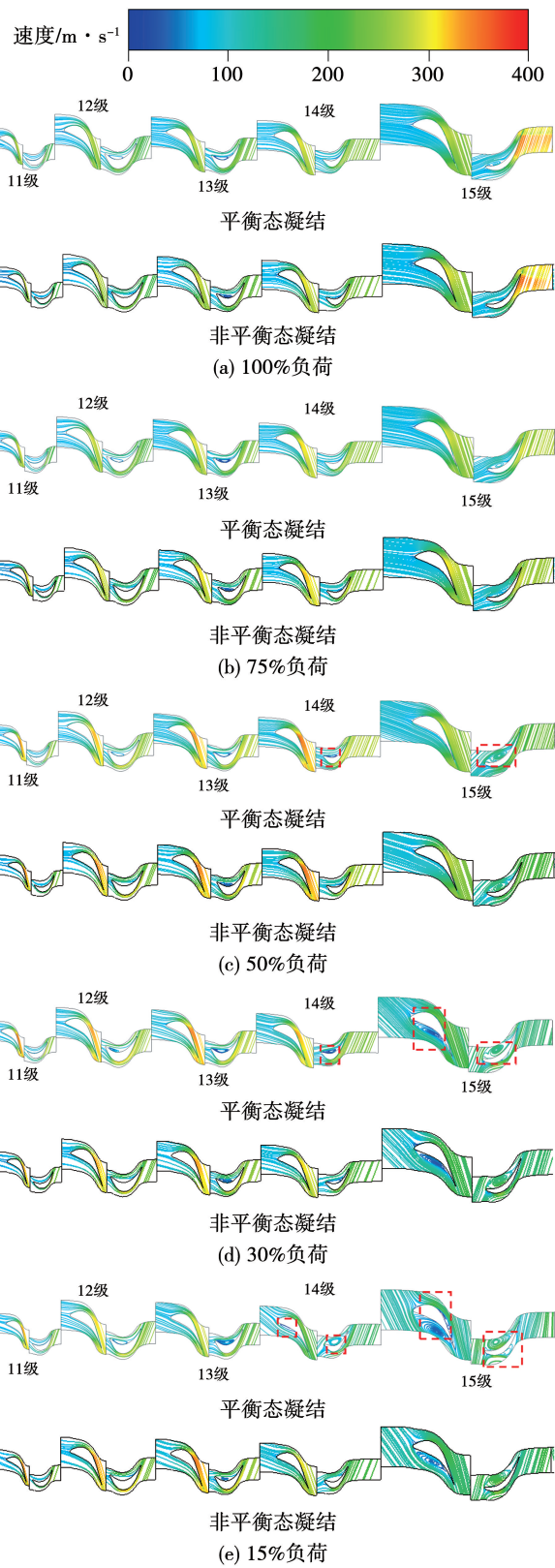


图4 汽轮机单通道流场末五级中叶展截面相对速度矢量分布

Fig.4 Relative velocity vector distributions of the middle spanwise section on last 5-stage in single path flow field of steam turbine

2.2 平衡态凝结与非平衡态凝结模型湿度分布对比

图5 对比了不同运行负荷下两种凝结模型各叶栅出口处的平均湿度分布。

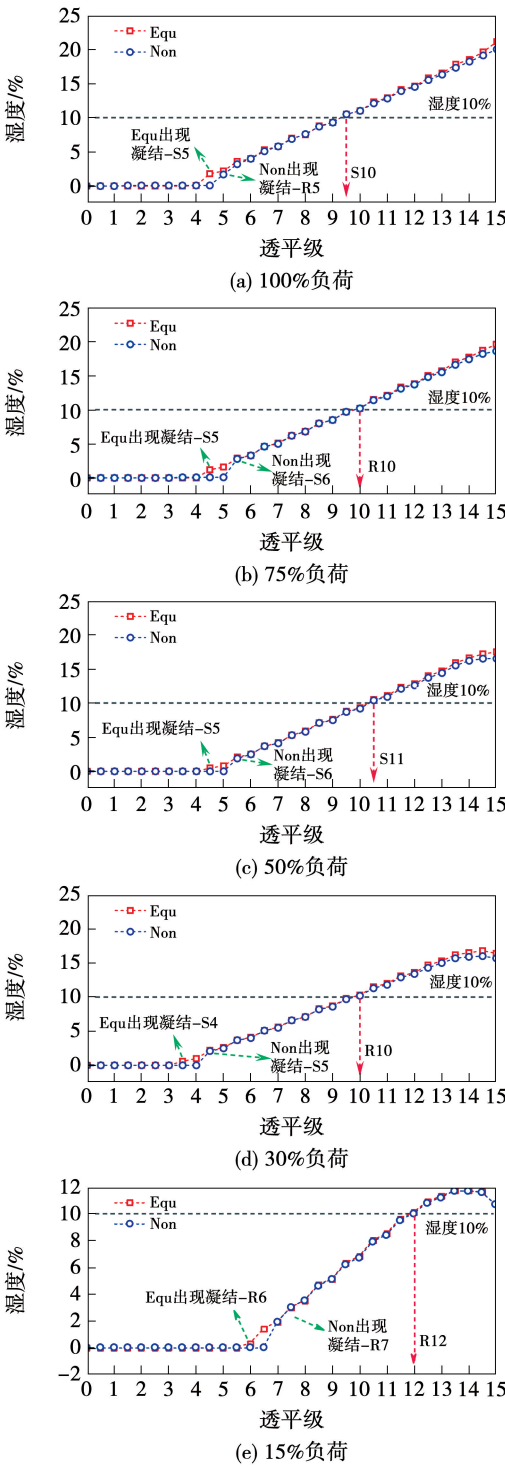


图5 不同负荷下平衡态凝结与非平衡态凝结模型各叶栅出口处平均湿度

Fig.5 Average humidities at outlet of each cascade of equilibrium condensation and non-equilibrium condensation models at different loads

图中 Equ 表示平衡态凝结模型,Non 表示非平衡态凝结模型。可以看出,包括最小负荷工况在内,两种凝结模型对各级叶栅出口处平均湿度变化趋势的预测较为一致。二者的差异表现为平衡态凝结模型预测汽轮机中首次出现蒸汽工质凝结的位置更接近汽轮机入口高压级叶栅,而非平衡态凝结模型的预测凝结发生点更靠近汽轮机的通流出口。这是因为非平衡态凝结的突出特点在于随着水蒸气的持续膨胀,其偏离平衡态的程度也逐渐增加,具体表现为过冷度的增大,当过冷度达到极限值(Wilson 点)时,水分子突然形成众多凝结核心并迅速凝结成小水滴。因此,非平衡态凝结模型的凝结发生点更靠近出口,且在不同运行负荷下湿度的增加幅度更大,反映了非平衡态凝结模型下越过 Wilson 点时突然发生相变过程的特点。

此外,从图中还可以看出,由汽轮机高压级至低压级,湿度逐渐升高,表现为上游叶栅中凝结的液态水随着蒸汽工质的流动在下游叶栅中逐渐聚集,导致末级动叶出口处的湿度达到最高。而随着运行负荷的降低,蒸汽工质的凝结位置总体呈先滞后、后提前的趋势。同时,随着蒸汽工质通流流量的减小,汽轮机内的凝结现象逐渐减弱,末级叶栅处的湿度逐渐降低。

2.3 平衡态凝结与非平衡态凝结模型整机性能对比

图 6 展示了不同运行负荷下两种凝结模型的各透平级功率对比。从图中可以看出,当负荷较大即汽轮机通流流量较大时,由高压透平级至低压透平级的级功率逐渐增大。以额定工况为例,级功率为第一级的两倍以上。然而,随着汽轮机负荷的降低,末级叶栅的轴功率呈现显著的下降趋势。当负荷降低至额定工况的 30% 时,末级叶栅已经无法输出功率,表明此时蒸汽工质在末级叶栅内的膨胀做功已无法支持该级动叶以额定转速旋转。出现这种现象一方面是由于汽轮机负荷的降低减小了蒸汽工质的通流流量,导致末级叶栅缺乏足够的蒸汽工质膨胀做功;另一方面是由于在较高压力的透平级中,持续发生的凝结进一步减少了在末级叶栅中进行膨胀做功的蒸汽工质流量。当负荷继续降低至额定工况的 15% 时,次末级的轴功率也呈现显著的下降趋势,此时末级的负功率输出现象继续恶化。

对比两种凝结模型可以看出,非平衡态凝结模

型和平衡态凝结模型表现出一致的级功率变化趋势,尤其是在汽轮机的高压级中更为明显。同时,除了最小负荷工况下的低压级叶栅外,在其他工况下,非平衡态凝结模型下汽轮机各级的级功率输出均略小于平衡态模型。

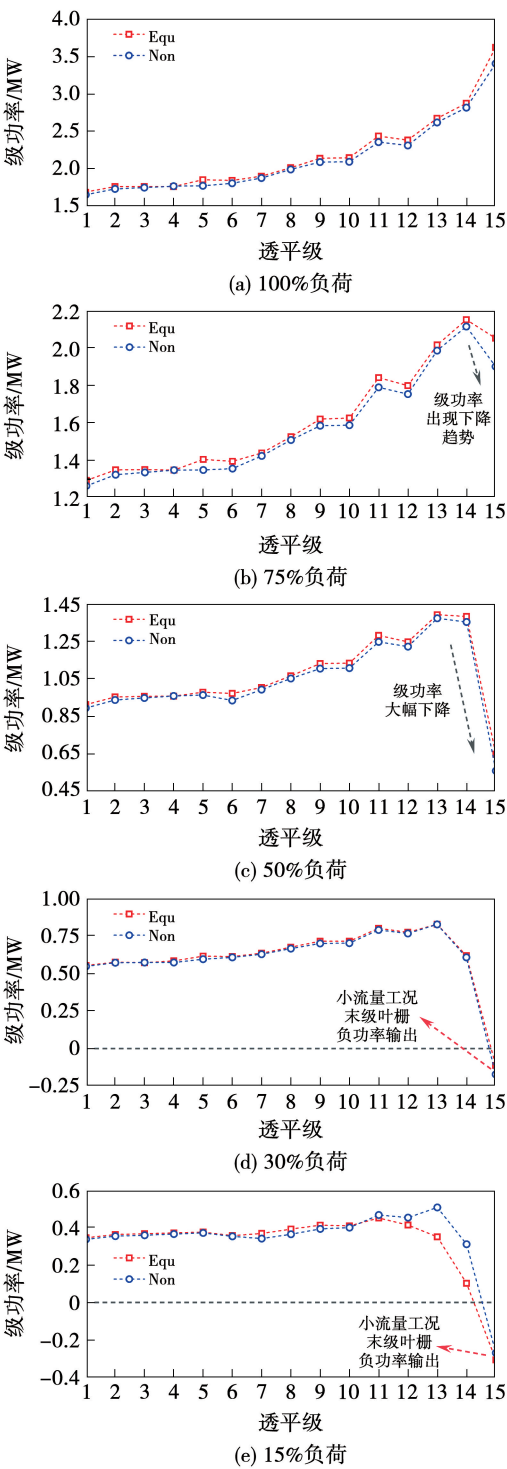


图 6 平衡态凝结与非平衡态凝结模型各透平级输出功率对比
Fig. 6 Comparison of output power of each turbine stage of equilibrium condensation and non-equilibrium condensation models

图 7 对比了各工况下平衡态凝结与非平衡态凝结时汽轮机各透平级轴功效率的变化。

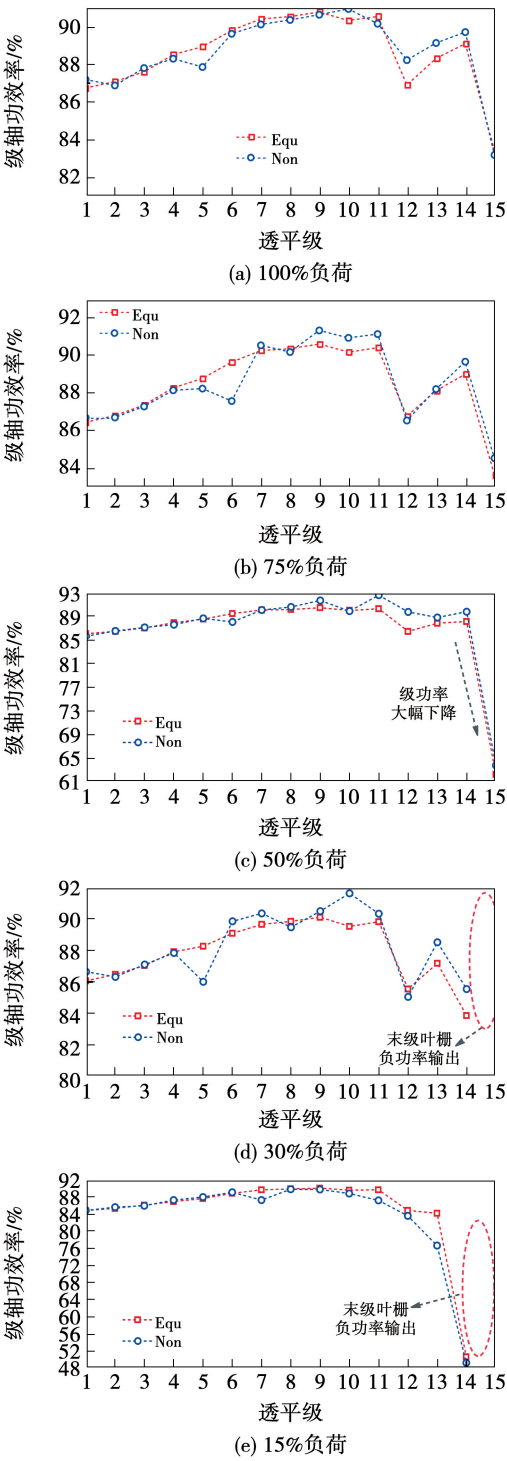
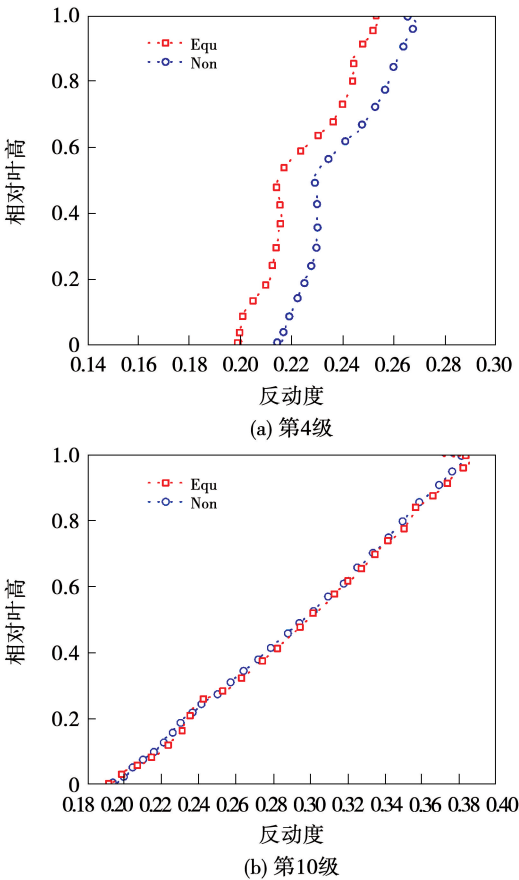


图 7 平衡态凝结与非平衡态凝结模型各透平级轴功效率对比

Fig.7 Comparison of shaft power efficiencies of each turbine stage of equilibrium condensation and non-equilibrium condensation models

从图中可以看出,当负荷较大即汽轮机通流流量较大时,汽轮机各透平级的轴功效率差异较小。然而,随着汽轮机负荷的降低,低压级叶栅的轴功效率呈现显著下降趋势。当负荷降低至额定工况的30%时,末级叶栅的轴功效率已经降低为负值,对应于此时末级叶栅的负功率输出。对比两种凝结模型可以看出,非平衡态凝结模型和平衡态凝结模型表现出一致的级功率变化趋势。二者的差异表现为平衡态凝结模型在高压透平级中效率略高,而非平衡态凝结模型在低压透平级中效率略高。同时需要指出的是,在不同运行负荷下,两种凝结模型的轴功效率首次出现明显差异的级数与平衡态和非平衡态凝结的凝结位置相符,这反映了非平衡态凝结对汽轮机级焓降分配的影响。

为进一步展示两种蒸汽凝结模型在焓降分配上的不同,图 8 给出了额定工况下第 4 级、第 10 级和第 14 级反动度沿叶高的变化曲线。可以看到,各级反动度均由叶根向叶顶逐渐增大,在靠近上下端壁的区域均表现出反动度变化较大的特征。两种凝结模型相比,在发生凝结前(第 4 级)非平衡态凝结的反动度较大,在凝结发生后(第 10 级和第 14 级)两种凝结模型的反动度沿叶高分布并无显著差异。



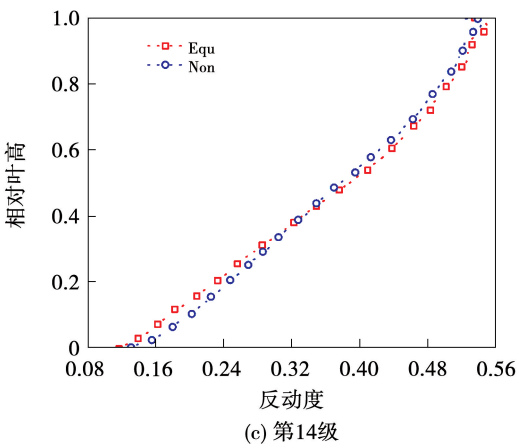


图 8 第 4 级、第 10 级与第 14 级反动度沿叶高分布
Fig. 8 Distributions of degrees of reaction along blade height at 4th, 10th and 14th stage

为了对比两种凝结模型对整机性能的影响,图 9 展示了各工况下平衡态凝结与非平衡态凝结模型下汽轮机的整机功率和整机轴功效率的变化。

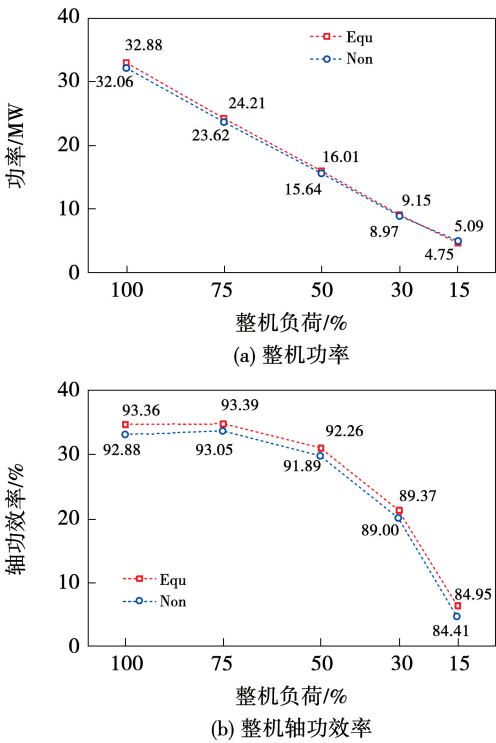


图 9 平衡态凝结与非平衡态凝结模型整机功率和轴功效率变化
Fig. 9 Changes of power and shaft efficiency of whole turbine with equilibrium condensation and non-equilibrium condensation models

从图中可以看出,随着汽轮机负荷的降低,整机

的功率输出也逐渐降低。同时,两种凝结模型的整机功率输出随负荷的变化趋势一致且幅值相近,表明二者均能较好地预测各工况下汽轮机的整机功率。此外,随着汽轮机负荷的降低,整机的轴功效率均呈现先小幅升高而后持续降低的趋势,在 75% 负荷下达到最大值。对比两种凝结模型可以看出,非平衡态凝结时整机轴功效率略低于平衡态凝集的预测值,但差异较小。这是由于在非平衡态凝结流动中,偏离平衡态带来的热力学损失影响了汽轮机通流部分的流动损失。此外,非平衡态凝结过程使汽相工质损失了部分动量,造成工质的做功能力下降,导致非平衡态凝结的汽轮机整机轴功效率略低于平衡态凝结。

3 结 论

本文针对某型十五级汽轮机整机的流动特性开展了数值计算分析,获得了十五级汽轮机整机在不同负荷下的流动及凝结特性,对比了 5 种不同运行负荷下的汽轮机性能参数,分析了汽轮机单通道流场中的凝结特性、流动结构与整机性能。根据结果分析得出以下结论:

(1) 在低运行负荷下,十五级汽轮机的末级叶片会出现汽流分离和排汽回流现象。当运行负荷降低至额定工况的 30% 时,汽轮机排汽出口靠近叶根处开始出现出口回流现象;当运行负荷降低至额定工况的 15% 时,末级动叶叶根处开始出现汽流分离现象。两种凝结模型对汽轮机流动特性的影响主要体现在流动速度的不同,非平衡态凝结的发生导致汽相损失了部分动量,流动速度低于平衡态凝结模型。

(2) 在不同运行负荷下,平衡态凝结和非平衡态凝结流动中,凝结发生的位置均不同。虽然非平衡凝结发生的位置更靠近出口,但湿度增加较快,表明此时蒸汽能够快速恢复至平衡状态。

(3) 随着运行负荷的降低,汽轮机叶栅通道内的整体湿度呈下降趋势,但当运行负荷下降至 30% 时,叶栅通道内的凝结有所增强;在最低运行负荷下,平衡态与非平衡态凝结的蒸汽凝结过程分别推迟至第 6 级与第 7 级发生。

(4) 随着运行负荷的降低,十五级汽轮机整机

的性能及效率整体上呈持续下降趋势。当运行负荷降低至额定工况的30%和15%时,蒸汽工质在末级叶栅通道内的膨胀做功已不足以维持末级动叶以额定转速旋转,无法输出功率。两种凝结模型相比,非平衡态凝结对焓降分配的影响导致在凝结发生位置的级效率较低。

参考文献:

[1] 吴 昕,李前宇,薛常海,等.深度调峰工况下350 MW 汽轮机组低压缸流场与温度场分布特性研究[J].热能动力工程,2022,37(9):59-65,72.

WU Xin,LI Qianyu,XUE Changhai,et al. Research on distribution characteristics of flow and temperature fields of 350 MW steam turbine low pressure cylinder under deep peak regulation condition [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(9):59-65,72.

[2] 宫啸宇,蒋 楠,戴义平.深度调峰运行时汽轮机低压叶片的安全性分析[J].热能动力工程,2023,38(9):21-29.

GONG Xiaoyu,JIANG Nan,DAI Yiping. Safety analysis of low-pressure turbine blades during deep peak shaving[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2023,38(9):21-29.

[3] MOORE M J,SIEVERDING C H. Two-phase steam flow in turbines and separators[M]. New York:Hemisphere Publishing Corporation,1976.

[4] 韩 旭,李恒凡,韩中合.关于汽轮机内湿蒸汽两相凝结流动的研究进展[J].热能动力工程,2016,31(5):1-6,146.

HAN Xu,LI Hengfan,HAN Zhonghe. Advances in the study of the wet steam two-phase condensation flow in side steam turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2016,31(5):1-6,146.

[5] 彭姝璇,杨爱玲,陈二云.液滴表面张力修正系数与蒸汽膨胀速率和进口参数的相关性研究[J].动力工程学报,2020,40(6):460-468.

PENG Shuxuan,YANG Ailing,CHEN Eryun. Correlation of droplet surface tension correction coefficient with steam expansion rate and inlet parameters[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2020,40(6):460-468.

[6] 吴 涛,杨爱玲,陈二云,等.汽轮机末级湿蒸汽凝结流动模型差异性研究[J].热能动力工程,2023,38(3):31-40.

WU Tao,YANG Ailing,CHEN Eryun,et al. Study on difference of condensation flow model of last stage wet steam in steam turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2023,38(3):31-40.

[7] 王 智,罗 彦,韩中合,等.湿蒸汽非均质高速凝结流动的数值研究[J].动力工程学报,2012,32(12):934-940.

WANG Zhi,LUO Yan,HAN Zhonghe,et al. Numerical study on high-speed heterogeneous condensation flow of wet steam[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2012,32(12):934-940.

[8] 王 智,安连锁,韩中合,等.凝结与边界层分离相互作用机理的数值研究[J].动力工程,2009,29(8):752-756.

WANG Zhi,AN Liansuo,HAN Zhonghe,et al. Numerical study of interaction of condensation and boundary layer separation[J]. Power Engineering,2009,29(8):752-756.

[9] 巫志华,李 亮,丰镇平.三维湿蒸汽自发凝结流动的数值模拟[J].动力工程,2006,26(6):814-817.

WU Zhihua,LI Liang,FENG Zhenping. Numerical simulation of 3D wet steam flow with spontaneous condensation[J]. Power Engineering,2006,26(6):814-817.

[10] 巫志华,吴其林,赵世全.大功率汽轮机湿蒸汽级两相凝结流动的数值模拟与分析[J].东方汽轮机,2010(2):17-21,27.

WU Zhihua,WU Qilin,ZHAO Shiquan. Numerical simulation and analysis of two-phase condensation flows in the wet steam stages of a high power turbine[J]. Dongfang Turbine,2010(2):17-21,27.

[11] 张 宇,李兴华,刘云锋,等.汽轮机末级静叶栅内非平衡态凝结流动的数值研究[J].汽轮机技术,2019,61(1):41-42,70.

ZHANG Yu,LI Xinghua,LIU Yunfeng,et al. Numerical research on non-equilibrium condensation flow in steam turbine last static cascade[J]. Turbine Technology,2019,61(1):41-42,70.

[12] 朱晓峰,林智荣,袁 新.湿蒸汽非平衡态凝结流动的数值方法研究[J].工程热物理学报,2012,33(8):1317-1321.

ZHU Xiaofeng,LIN Zhirong,YUAN Xin. Numerical methods development for non-equilibrium wet steam condensing flow [J]. Journal of Engineering Thermophysics,2012,33(8):1317-1321.

[13] 张冬阳.非平衡态湿蒸汽流动快速准确数值模拟方法研究[D].北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所),2002.

ZHANG Dongyang. A fast and accurate numerical simulation method for nonequilibrium wet steam flow[D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermal Physics),2002.

[14] 杨建道,游 玮,李 亮,等.核电汽轮机低压缸中平衡和非平衡凝结流动的对比研究[J].热力透平,2013,42(1):9-14.

YANG Jiandao,YOU Wei,LI liang,et al. Comparative research on equilibrium and non-equilibrium condensation flow in low pressure cylinder of nuclear turbines[J]. Thermal Turbine,2013,42(1):9-14.

[15] 刘云锋,杨晓辉,李宇峰,等.大型核电汽轮机末级长叶片开

- 发中若干问题讨论[J]. 热能动力工程,2022,37(3):81-85.
- LIU Yunfeng, YANG Xiaohui, LI Yufeng, et al. Discussion on several issues in the development of last stage long blades of large-scale nuclear power turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 81-85.
- [16] 高德伟. 汽轮机湿汽损失的分析与研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(11): 847-852.
- GAO Dewei. Analysis and study on moisture loss in steam turbines[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(11): 847-852.
- [17] STARZMANN J, CASEY M, MAYER J F, et al. Wetness loss prediction for a low pressure steam turbine using computational fluid dynamics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A, Journal of Power and Energy, 2014, 228 (A2): 216-231.
- [18] STARZMANN J, CASEY M, SIEVERDING F. Non-equilibrium condensation effects on the flow field and the performance of a low pressure steam turbine[C]//ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2010.
- [19] 韩中合, 韩旭, 李鹏. 汽轮机内湿汽损失定量评估研究进展[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 1-6.
- HAN Zhonghe, HAN Xu, LI Peng. Progress of quantitative evaluation of wetness losses in steam turbine[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 1-6.
- [20] GYARMATHY G. Bases of a theory for wet steam turbines[D]. Swiss; Federal Technical University of Zurich, 1962.
- [21] LAALI A R. A new approach for assessment of the wetness losses in steam turbines[C]//Institution of Mechanical Engineers Conference; Turbomachinery, 1991: 155-166.
- [22] 李瑜, 宁德亮, 李亮, 等. 汽轮机中湿汽损失的定量计算[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(1): 25-30.
- LI Yu, NING Deliang, LI Liang, et al. Quantitative evaluation of wetness losses in steam turbine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(1): 25-30.
- [23] 余兴刚. 汽轮机低压级内湿蒸汽流动特性的数值研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
- YU Xinggang. Numerical investigation of wet steam flow in the low pressure stage of steam turbine[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [24] WROBLEWSKI W, DYKAS S, GARDZILEWICZ A, et al. Numerical and experimental investigations of steam condensation in LP part of a large power turbine[J]. Journal of Fluids Engineering, 2009, 131(4): 041301.
- [25] YOUNG J B, YAU K K. The inertial desposition of fog droplets on steam turbine blade[J]. Journal of Turbomachinery, 1988, 110: 155-162.
- [26] 李亮, 薛太旭, 李森. 考虑气动和湿汽损失综合影响的低压多级透平优化[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(3): 22-28.
- LI Liang, XUE Taixu, LI Sen. Optimization for low-pressure multi-stage turbine considering influences of aerodynamic losses and wetness losses[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(3): 22-28.
- [27] 谈晓辉, 张奔, 王耀文, 等. 小流量工况下汽轮机低压缸内流动与鼓风加热特性数值研究[J]. 汽轮机技术, 2022, 64(6): 445-450, 455.
- TAN Xiaohui, ZHANG Ben, WANG Yaowen, et al. Numerical study on flow and windage heating characteristics in low pressure cylinder of steam turbine under small mass flow conditions[J]. Turbine Technology, 2022, 64(6): 445-450, 455.

(刘颖编辑)