

排气蜗壳与轴流涡轮相互作用的气动性能研究进展

陶春德¹, 高 杰¹, 牛夕莹², 霍东晨¹

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘 要:排气蜗壳是连接燃气轮机末级涡轮与大气的关键部件,同时也是进一步提高动力装置输出功率最有潜力的部件之一,其与上游末级轴流涡轮因紧密耦合而产生的流动复杂性和非定常性可对涡轮和排气蜗壳的气动性能产生较大影响。国内外研究大多集中于单独的排气蜗壳性能和优化,而对排气蜗壳与轴流涡轮之间耦合的相互作用研究很少。本文主要从排气蜗壳内流动和损失机理、涡轮和排气蜗壳之间流动的相互作用以及排气蜗壳和轴流涡轮耦合的数值研究方法等方面对排气蜗壳内部流场分布及其与轴流涡轮流动相互作用的气动性能研究进展进行综述,重点梳理了二者流动的相互作用以及相关研究方法。最后,对排气蜗壳与轴流涡轮气动性能耦合研究的未来研究重点和发展趋势进行了展望。

关 键 词:轴流涡轮;排气蜗壳;相互作用;气动性能;耦合研究

中图分类号:U664.131 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.10.018

[引用本文格式]陶春德,高 杰,牛夕莹,等. 排气蜗壳与轴流涡轮相互作用的气动性能研究进展[J]. 热能动力工程,2021,36(10):136-146. TAO Chun-de, GAO Jie, NIU Xi-ying, et al. Advances in aerodynamics performance of the interaction between exhaust volute and axial turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10):136-146.

Advances in Aerodynamics Performance of the Interaction Between Exhaust Volute and Axial Turbine

TAO Chun-de¹, GAO Jie¹, NIU Xi-ying², HUO Dong-chen¹

(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code:150001;
2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code:150078)

Abstract: As a key component which connecting the last stage turbine of gas turbine to the atmosphere, also one of the most potential units for further improving the output power of the power plant, exhaust volute is closely coupled to the axial turbine. This coupled flow field, which has a great impact on the aerodynamic performance of the turbine and the exhaust volute, is unsteady and complex. The research progress on aerodynamics performance of coupled axial turbine and exhaust volute over the past decades are reviewed in three aspects: flow mechanism and loss characteristics of exhaust volute, flow interaction between turbine and exhaust volute, and numerical research methods of coupled turbine and exhaust volute. The emphasis is placed on the turbine-exhaust volute interactions and research methodology. Furthermore, the key trends and future research priorities regarding coupled axial turbine and exhaust volute aerody-

收稿日期:2021-04-06; 修订日期:2021-05-11

基金项目:国家自然科学基金(51979052);哈尔滨工程大学中央高校基本科研业务费专项基金(3072020CFT0304);黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2020E024);国家科技重大专项(J2019-II-0009-0029)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51979052); Fundamental Research Funds for the Central Universities of Harbin Engineering University (3072020CFT0304); Excellent Youth Project of Heilongjiang Natural Science Foundation (YQ2020E024); National Science and Technology Major Project(J2019-II-0009-0029)

作者简介:陶春德(1996-),男,青海海东人,哈尔滨工程大学硕士研究生。

通讯作者:高 杰(1985-),男,河南镇平人,哈尔滨工程大学教授。

namics performance are briefly presented.

Key words: axial turbine, exhaust volute, flow interaction, aerodynamic performance, coupled research

引 言

汽轮机需要安装排气蜗壳把做功后的废汽排到其后的冷凝器中。完整的排气蜗壳由扩压器、集气壳以及起支撑作用的支板等组成。从末级涡轮排出的气流在排气扩压器中减速并膨胀,同时扩压器将气流的动能转化为静压的上升,即为静压恢复过程。一般情况下排气蜗壳出口背压是一定的,如果气流在扩压器内能得到极其有效的静压恢复,动力涡轮出口的压力就会降低,最终装置的输出功率就能有所提高^[1]。此外,由于安装空间限制,废气也不是直接沿着轴向排出,而是在排气蜗壳内经历由轴向转到径向的 90° 转弯之后再排出。因此,排气蜗壳的结构必须设计成弯曲式。气流在弯管中的流动极其复杂,尤其是弯管中存在扩压流动时,会产生流动损失从而影响到排气蜗壳的性能。扩压器后部连接着集气壳,集气壳的作用是收集从扩压器周围流出的气体,由于从扩压器流出的气流方向各不相同,速度分布不均匀,因此集气壳中的流动也极为复杂^[2]。排气蜗壳的工作状况对燃气轮机和汽轮机等装置的总体性能有一定的影响。文献[3]指出,一般排汽缸损失系数降低 0.1,可相应使汽轮机的效率提高约 0.15%,而在燃气轮机中排气蜗壳的动能占到了整个涡轮做功的 10%^[4]。Tanuma 等人^[5]对汽轮机装置当中的损失来源进行了排列,排汽缸产生的气动损失排在第 2 位,其损失大小几乎等同于排在第 1 位的低压涡轮定子和转子叶片的损失。因此,排气蜗壳性能对装置总体性能的提高也有很大的开发潜力和研究价值。

过去的 30 多年来,单独针对排气蜗壳内部流场的研究比较多^[6],但是考虑排气蜗壳与涡轮之间流动相互作用的研究还很少见。排气蜗壳与末级涡轮紧密耦合,它们之间的流动相互作用实际上是极其复杂的,还具有非定常性。末级涡轮动叶出口的流动状态会影响到下游排气蜗壳的性能,而排气蜗壳非对称的几何结构又会反过来影响涡轮的气动性

能。因此对涡轮与排气蜗壳耦合相互作用关系的研究非常有必要。

本文在文献[7]的基础上,重点从 3 个方面对排气蜗壳与轴流涡轮之间流动相互作用的气动性能研究进展进行综述:排气蜗壳内部流动机理和损失特性、轴流涡轮与排气蜗壳耦合的流动相互作用及耦合数值研究方法。对排气蜗壳内部流场分布以及与轴流涡轮流动相互作用的各种影响因素进行了梳理,最后对排气蜗壳与轴流涡轮气动性能的未来研究重点和发展趋势进行了展望。

1 排气蜗壳内部流动机理和损失特性

排气蜗壳性能的评价指标主要包括静压恢复系数 C_p 、总压损失系数 C_{pt} 和出口气流的不均匀度 χ ^[8-10]:

静压恢复系数定义为:

$$C_p = \frac{\bar{p}_2 - \bar{p}_1}{\bar{p}_{01} - \bar{p}_1} \quad (1)$$

总压损失系数定义为:

$$C_{pt} = \frac{\bar{p}_{01} - \bar{p}_{02}}{\bar{p}_{01} - \bar{p}_1} \quad (2)$$

出口不均匀度系数定义为:

$$\chi = \frac{V_m}{V_a} \quad (3)$$

式中: $\bar{p}_{01}$ 、 $\bar{p}_{02}$ —进出口平均总压; $\bar{p}_1$ 、 $\bar{p}_2$ —进出口平均静压; V_m —排气蜗壳出口质量平均的平均速度; V_a —在相同质量流量情况下,假设排气蜗壳出口截面处速度均匀时的均匀速度。

排气蜗壳对于动力装置性能的影响是间接的,对于它们的研究并不像压气机和涡轮那样广泛。而且早期针对排气蜗壳的研究和设计都是在没有考虑末级涡轮的影响单独进行的。Zoe Burton 等人^[6,11]对国内外 30 多年来关于排汽壳的流场结构和研究方法进行了系统综述,得出结论,排汽蜗壳内存在复杂的流场结构,包括扩压器内存在的涡流和流动分离,以及末级涡轮流动引起的非定常流动等,如图 1 所示。

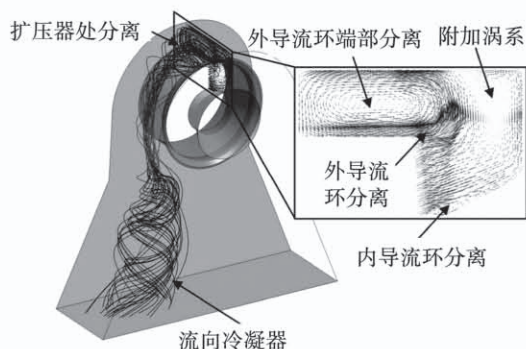


图1 排汽系统内涡系和复杂流动结构

Fig. 1 Vortices and complex exhaust hood flow structure

排汽蜗壳内流动结构复杂,末级叶片下游旋流的压力、速度和温度分布都不均匀,且排汽蜗壳内大流量转动会产生一系列的流动分离^[6]。徐旭等人^[12]采用数值方法系统研究了低压汽轮机排汽壳内的涡系对排汽蜗壳性能的影响,发现排汽蜗壳内存在通道涡、分离涡、端壁涡和二次流涡。而且排汽蜗壳的流动损失主要是由通道涡引起的,此外分离涡也造成了一定的总压损失^[13],如图2所示(图中C1和C3代表排汽蜗壳不同周向位置的截面)。

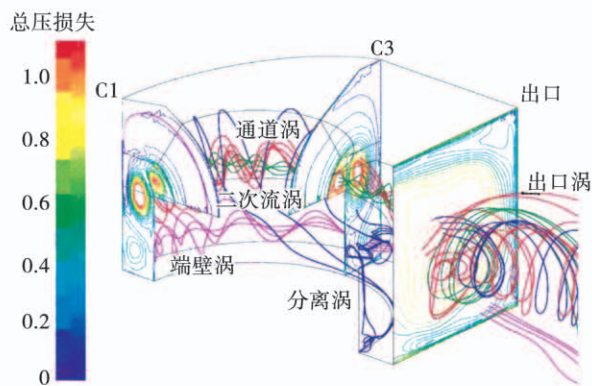


图2 排汽壳内涡系和总压损失图

Fig. 2 Group of vortices and contours of total pressure loss

Zhang 等人^[14]采用粒子图像测速法(PIV)研究了排汽蜗壳三维流场结构,观测到了排汽蜗壳内部不同尺度的涡,包括导流环顶部后方一个强分离涡(SV),排汽罩顶部纵向涡(LV),贯穿于流道的大尺度通道涡(PV)以及与前端端壁相邻区域的端壁涡(EWV)等,而且分离涡和通道涡消耗了大部分动能并降低了压力恢复能力,这也与徐旭等人的结论

近似。

研究表明,在排汽蜗壳扩压器段的内外导流环处存流动分离,而这种流动分离会显著降低其扩压性能。Owczarek^[15]最早采用试验方法观测到了内导流环处的流动分离和由此产生的马蹄涡,其研究表明扩压器进口的流动是附着导流环壁面,但沿导流环流动出现分离。宋震、Tindell 和樊涛等人^[10,16-17]研究发现内导流环处流动分离产生的马蹄涡是造成排汽蜗壳损失的主要原因之一。樊涛^[17]和刘建军^[18]分别研究得出,扩压器的入口条件对其性能影响很大,且在扩压器入口气流非均匀情况下才会发生流动分离。

2 排汽蜗壳与轴流涡轮流动相互作用

早期对于排汽蜗壳流动机理与气动性能的研究都是在没有考虑上游末级涡轮影响的情况下进行的。但是随着相关研究逐渐深入,研究人员发现排汽蜗壳与末级涡轮之间存在流动的相互作用,而这种相互作用对于涡轮和排汽蜗壳的性能都有很大影响。刘建军^[18]、付文锋^[19]、付经伦^[20]和宋震等人^[21]对此进行了大量的研究,发现在有无上游涡轮出口条件的情况下,排汽蜗壳内部的流动状态和性能有很大差别。末级涡轮的出口条件对排汽蜗壳的性能有很大影响。反之,排汽蜗壳的流场又会影响涡轮机的性能乃至涡轮叶片的运行安全。

2.1 轴流涡轮对下游排汽蜗壳性能的影响

Benim 等人^[22]研究得出,末级动叶栅与排汽蜗壳之间的流动相互作用。此后,Musch 等人^[23]经过研究总结出:影响排汽扩压器流场的主要因素是末级涡轮的出口旋流和叶顶间隙泄漏流,以及涡轮出口压力分布。

2.1.1 入口旋流角出口

涡轮出口旋流角方向说明如图3所示,当涡轮出口速度切向分量与转子旋转方向相同时,定义该旋流角为正^[24]。

Štastný 等人^[25-26]通过研究指出,随着进口平均旋流角增大,扩压器内的分离度增大。Vassiliev 等人^[27]通过试验和数值模拟研究了入口旋流和马赫数对扩压段的影响,发现排汽扩压段的扩压性能

主要与入口旋流角有关,而与入口马赫数无关。Vassiliev 等人^[28]进一步研究发现,适度的入口旋流角还有利于提高扩压性能,这一点与 McDonald 和 Kumar 等人^[29-30]的观点一致。付经伦等人^[31]通过试验和数值模拟方法研究了涡轮和排汽壳耦合后的流场分布情况,发现上游涡轮机的旋流角分布和总压分布对排汽壳性能有不利影响;相比于无旋流、总压均匀进气条件,涡轮出口处的大旋流角和总压沿径向的正梯度分布导致扩压器内产生流动分离并恶化了排汽壳的性能。Fleige 等人^[32]研究发现,当入口旋流角大于 8° 时,扩压器压力恢复性能就会受到不利影响;Vassiliev 等人^[28]发现,在入口旋流角大于 20° 时排气扩压段的性能快速下降。由此可见,入口旋流角对排汽扩压器性能的影响是双向的,且存在一定的影响范围。付经伦^[33]提出了能改善排汽蜗壳气动性能的来流切向气流角,并进行了数值模拟验证,即入口旋流角沿径向分布为 $80^\circ h$ 时(定义旋流角随径向高度 h 的变化函数为 $F(h) = ch^n$),排气蜗壳的扩压能力、流动阻力及非轴对称流场的周向不均匀度都得到了改善。Opilat^[34]通过试验研究了进口马赫数和气流角对排气蜗壳气动性能的影响,其结果表明,相比于进口无旋流的工况,正的旋流角($5^\circ \sim 10^\circ$)可以提高静压恢复系数,而负的旋流角则可以减小静压恢复系数;静压恢复系数随进口马赫数的增大而增大。

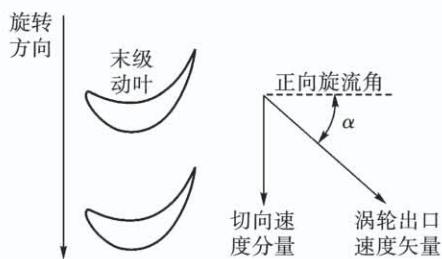


图 3 旋流角方向示意图

Fig. 3 Diagram of the direction of swirl angle

近年来,对于入口旋流角的研究逐渐开始考虑支撑板结构的影响。徐自荣等人^[24]采用数值计算方法研究了入口气流旋流角对带支撑结构轴流排气扩压段气动性能的影响。董雨轩等人^[35]通过改变导叶的偏转角来获得排气蜗壳测量段不同的进气预

旋。研究表明,在进气预旋为 0.3549 时,排气蜗壳的静压恢复系数达到最大值,超过该进气预旋值后,静压恢复系数迅速下降。

对于入口旋流角的影响研究,有的是模拟涡轮与排气蜗壳耦合的真实条件进行的,而有的则采用特殊方法模拟了入口旋流角带来的影响,如 Vassiliev^[28]的 IGV 和刘建军等人^[36-37]的数值激盘模型等。无论哪种方法,都强调了入口旋流角对排气性能的影响,以及未来在设计研究时将旋流角的影响加以考虑的必要性。

2.1.2 动叶叶顶间隙泄漏流的影响

相关研究表明,涡轮叶顶间隙泄漏流动对其流道内气动损失、传热状况甚至总体效率都有较为明显的影响,是降低涡轮气热性能的关键因素之一^[38]。在末级涡轮与排气蜗壳耦合时,其叶顶间隙泄漏流不可避免地影响到下游排气蜗壳的性能。

Farokhi 等人^[1]最早进行了叶顶泄漏流对排气扩压器性能影响的研究。研究表明叶尖泄漏流是一种高能量壁面射流,因此能够增强排气扩压器的压力恢复性能。David 等人^[39]通过耦合末级涡轮与排气蜗壳发现,对于靠近失速点的扩压器,增大转子径向间隙对扩压器特性有利。Finzel 等人^[40]采用试验方法研究了叶顶泄漏流马赫数对排汽壳性能的影响,结果表明,末级转子叶片的叶尖泄漏流可以减少扩压器上部壁面边界层的堵塞,从而提高排汽壳的压力恢复能力;当叶尖气流马赫数大于主流马赫数时,泄漏流对排汽壳的压力恢复有积极影响,但是高马赫数叶尖气流与主流的混合损失对压力恢复有不利影响。类似的结论也来自 Tanuma 等人^[41]的数值研究结果。Opilat^[34]研究了叶顶部间隙泄漏流对排汽缸静压恢复系数的影响,结果同样表明,顶部间隙射流的存在使静压恢复系数提高。但上述研究都是在没有支板结构影响的情况下进行的,在考虑支板的排气扩压器内,在叶顶或主流上叠加旋流时,叶尖泄漏流对扩压器性能的有利影响不明显;带有一定旋流角度的叶尖泄漏流与支板的相互作用甚至还会降低扩压器的整体性能。

关于叶顶间隙泄漏流对排气蜗壳的影响逐渐引起国内研究者的注意。李军^[42]先后开展了考虑末

级动叶顶部间隙效应和末级动叶扭转效应的排汽缸静压恢复能力研究,同时对末级整圈与排汽缸耦合进行了计算分析。其研究表明,末级动叶顶部间隙射流可以有效地抑制排汽缸扩压器内的分离流动,进而提高排汽缸的静压恢复能力。史立群^[43]、吴飞等人^[44]也进行了相关研究。其中吴飞采用数值方法研究了透平末级动叶顶部间隙变化对排气扩压器气动性能的影响。结果显示,随着叶顶间隙相对值从0逐渐增大至1.5%,排气扩压器进口气流角和总压逐渐增大,而排气扩压器静压恢复性能先提升,然后逐渐下降。

综上所述,涡轮转子叶顶间隙泄漏对排气蜗壳压力恢复性能的影响主要有两个方面:一方面是叶顶泄漏流抑制了扩压器内的流动分离,缩小了堵塞区域,从而降低了分离损失和堵塞损失,提高了压力恢复效率;另一方面,高马赫数叶尖泄漏流增加了扩压器进口处与主流的混合损失,降低了压力恢复性能。因此,为了准确地计算排气系统的气动性能和内部流场,必须考虑末级全周涡轮和转子叶尖泄漏流。

2.1.3 末级涡轮出口压力分布的影响

如图4所示,Burton^[6]总结并比较了两位学者研究的轴流涡轮出口总压分布的数据。可以看出,在20%~80%的叶高位置,总压分布几乎是均匀的。而在叶顶间隙处总压的升降都是受叶顶泄漏流影响的。刘建军^[37]研究发现,叶片轮毂处较高的总压对内导流环处的流动分离有积极的影响。付经伦^[45]的压力梯度研究结果显示,扩压器进口的逆压力梯度会促进内导流环处的分离,而正压梯度会抑制这种分离。

2.2 轴流涡轮与排气蜗壳的非定常相互作用耦合

以上关于排气蜗壳与涡轮相互作用的研究大都是基于定常流动假设进行的,然而轴流涡轮及非轴对称排气蜗壳内的流动实质上都是非定常的。关于涡轮内部的非定常流动研究一直受到了高度重视,并且随着计算机技术的不断进步相关研究也一直在更深入地进行。但是目前针对排气蜗壳与末级涡轮级之间相互作用的非定常研究只有极少数文献涉及,而要设计高效的排气扩压器和动力涡轮,就必须考虑这种特殊的非定常相互作用。

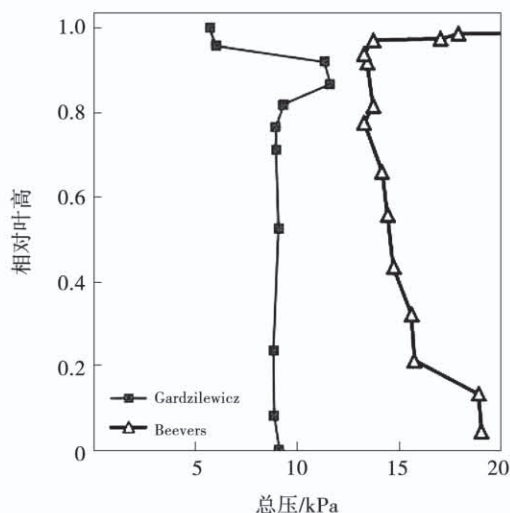


图4 涡轮出口总压分布对比

Fig. 4 Comparison of total pressure distribution at rotor outlet

Solodov 和 Gnesin^[46]采用非定常三维欧拉求解器对末级涡轮和排汽壳进行了三维非定常模拟,并对叶片气动力进行了计算。其计算结果表明,当体积流量减小时,叶片力的初始谐波振幅的绝对值会增大。付经伦等人^[31]采用试验和数值模拟方法研究了耦合的单级涡轮和排汽蜗壳模型的流场,结果显示,排汽蜗壳产生的非对称压力会由集气壳逐渐向上游传播到涡轮出口,最终会导致每个涡轮叶片上的负载发生变化。高杰等人^[47]对船用燃气轮机带冠涡轮叶片与排气蜗壳耦合的模型进行了数值模拟研究。结果显示,排气蜗壳内的非轴对称流场导致叶片力产生低频波动,而且排气蜗壳产生的非轴对称流场对叶片非定常力的影响远大于转子-支板相互作用的影响。付经伦等人^[48]进一步对不同工况下的非定常流动进行了研究并得出:由排汽蜗壳流引起的低频波动幅值 f 大于动静干涉导致的高频波动 f_c 幅值,而且随着流量系数的增大,排气蜗壳非定常流的频率和振幅都会增加,同时扩压器轮毂处的旋流角也会增大;排汽蜗壳内流场较低的非轴对称水平有助于降低低频叶片应力,如图5所示。

为了在计算条件有限的范围内仍能够进行足够精度的计算和深入的研究,Burton^[11,49-50]在其相关研究中引入了非线性谐波法(NLH),并将其用于末级轴流涡轮与排汽蜗壳的耦合计算。其研究表明,

采用非线性谐波方法仅对单个叶片通道进行模拟时,就可以捕捉到排气蜗壳进口非均匀流动,而 CPU 需求量仅为稳态模拟的 7 倍,明显低于冻结转子法等全周计算方法。黄恩德^[51]将此方法用于研究涡轮与排气蜗壳之间的流动机理,结果表明,NLH 结果表现出了一定的非定常性,绝对马赫数周向变化的不连续性更为明显;此外,蜗壳非轴对称流场中的背压对转子叶片吸力面的影响要大于其对压力面的影响。

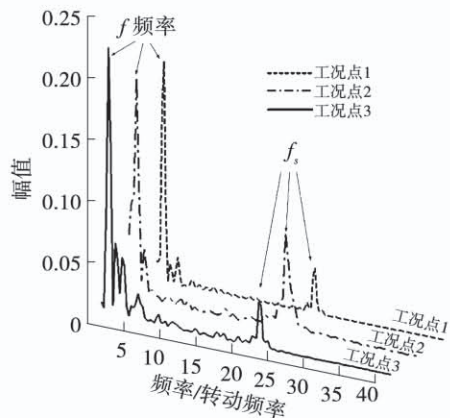


图 5 计算的转子叶片非定常气动力系数频谱图

Fig.5 Computed unsteady coefficient of force component (frequency spectrum) for the rotor blade

3 排气蜗壳与轴流涡轮耦合的数值研究方法

随着计算机硬件技术的进步以及研究的不断深入,仅依靠试验手段难以完全理解排气蜗壳内部复杂的流动细节,CFD 技术在相关研究中发挥着越来越重要的作用。Tindell^[52]早在 1992 年强调了利用 CFD 技术来评估低压汽轮机排气壳性能的可行性。刘学义等人^[53]采用数值模拟研究舰用燃气轮机排气蜗壳,得到了扩压器内部的基本流场。Vassiliev 等人^[54]建立了一个自动模拟排气扩压器中三维湍流流动的程序,并且采用了近壁面的湍流模型来代替之前低精度的壁面函数。Volkmer 等人^[55]研究了混合尺度自适应模型在排气蜗壳中的应用。计算结果表明,在 SST 湍流模型下,采用定常或非定常雷诺平均 Navier-Stokes 模拟可以得到类似的排气蜗壳流场结果,复杂的尺度自适应模拟方法能更好地解决

非定常波动问题。

由于末级涡轮与排气蜗壳之间复杂的流动相互作用,若要在研究中得到更精确和符合实际的模拟结果,就必须要将涡轮与排气蜗壳耦合进行计算。而耦合的流场是三维和非定常的,若要考虑涡轮级全周的叶片来获得更真实的结果,势必会大幅度增加计算的规模。为了在不影响结果精确度的前提下尽可能减少计算量,研究者针对耦合计算开发和完善了一系列有效的计算方法。

3.1 混合平面法

计算域动静叶列间以及排气蜗壳的气动参数传递是耦合计算的重要环节,末级动叶排与排气蜗壳模型的连接方式更是计算中的关键部分。如图 6 所示。樊涛和谢永慧^[17,56]采用混合平面法 (Mixing Plane Method) 来连接涡轮与排气蜗壳,同时,采用了 Denton^[57]的外推边界无反射边界条件,也称为周向非均匀混合平面方法。

由于此方法只模拟了上游一个叶片通道因而可以降低计算量,但是它在混合平面处对结果进行周向平均,使得涡轮出口的周向不均匀性无法被捕捉到,此方法只能得到参数沿径向的变化。如要考虑诸如旋流角和总压分布等影响条件时,此方法比较局限。

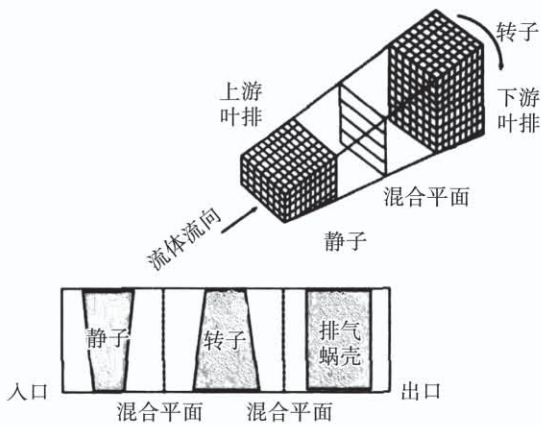


图 6 混合平面法示意图

Fig.6 Schematic diagram of mixing plane method

3.2 冻结转子法

转子冻结法与混合面法的不同之处在于转子和静子之间的信息不是简单切向平均,而是通过插值而来,这样就充分考虑了气流参数沿周向分布的不

均匀性^[58]。考虑到排气蜗壳流场的非轴对称性,付经伦等人^[48]认为应该将末级涡轮级全周的叶片都进行耦合计算,然后采用冻结转子法(Frozen Rotor Approach)进行计算域的连接。高杰^[47]和柴家兴等人^[59]也采用冻结转子法来连接动叶与扩压器入口的交界面,而在动静叶排之间采用了混合平面法。冻结转子法考虑了非轴对称和整周的叶片影响,结果相比混合平面法更加精确和接近真实情况。但是此方法面临的一个问题是需要很大的网格单元数(54M)^[60],以及大量的计算时间(267 h)^[61]。

3.3 非线性谐波法

He 和 Ning^[62]在 1998 年提出了一种计算叶轮机械非定常流动的方法—非线性谐波法(NLH),相比于其他的非定常计算方法,它具有占用资源少、计算时间短等优点。Burton 等人^[11,49-50]率先采用 NLH 法来研究轴流涡轮与排气蜗壳之间的流动相互作用,并在相同条件下与上述的混合平面法以及冻结转子法就计算结果、计算网格数以及所需的计算资源等参数进行了对比,其参数和结果对比如图 7 所示。

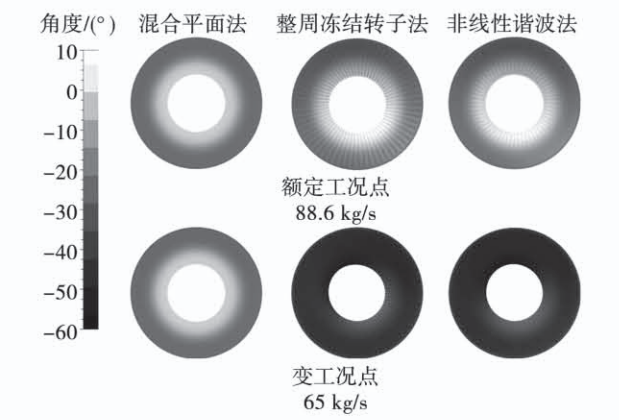


图 7 在设计点和变工况下排气罩入口旋流角分布
Fig.7 Swirl angle distribution at exhaust hood inlet plane at nominal load and off design

从 3 种方法所得的排气蜗壳进口旋流角分布可以看出,由于在周向进行了平均,采用混合平面法只能捕捉旋流角沿径向的变化;而相同条件下的冻结转子法和非线性谐波法不仅捕捉到径向变化,还能展现入口旋流角分布沿周向的不对称性,充分体现了上游涡轮叶片排对排气蜗壳的影响。表 1 比较了两种冻结转子法(分别为单个静叶和整周静叶片)

和非线性谐波法所得到的静压恢复系数和计算所需内存。可以看出,冻结转子法和非线性谐波法在扩压器性能预测结果上是非常接近的;同时,相比于考虑全周静叶和动叶的冻结转子法,非线性谐波法仅需要其一半的计算内存就可以得到与之相似的结果。黄恩德^[51]采用此方法研究了涡轮与排气蜗壳之间的相互作用,其采用的扰动的个数 M 和模拟每个扰动所需要的谐波个数 N 分别为 2 和 4。Burton 等人也指出,在采用冻结转子法来连接涡轮和排气蜗壳时,可只考虑单个静叶+整周动叶组合的方式,这相比于整周静叶参与计算能减少将近一半的计算资源。

表 1 各种计算方法得到的 C_p 和需要的内存对比^[11]
Tabl.1 C_p and memory requirement for each method^[11]

计算方法	C_p	内存/MB
非线性谐波法(NLH)	0.247 9	4 966
整周静子冻结转子法	0.241 1	9 537
单静子冻结转子法	0.245 3	5 099

3.4 数值激盘模型法

刘建军等人^[36-37,63]发展并完善了数值激盘模型(Actuator Disk Model),将其应用于汽轮机末级透平和排气蜗壳的计算中。数值激盘模型将叶栅简化为一零厚度盘面。圆盘有两面,一侧对应叶片排的进口,另一侧对应叶片排的出口。通过圆盘上的流动参数可以发生跳跃,从而实现叶排内部的流动转变和熵增。从数值计算的角度来说,激盘就是一个几何上连续和物理上不连续的边界,如图 8 所示。

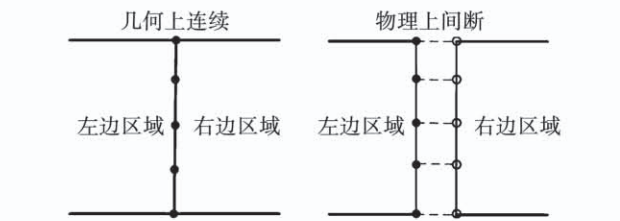


图 8 数值激盘模型示意图
Fig.8 Illustration of actuator disk model

激盘左侧和右侧分别属于左侧和右侧的计算域;而由激盘分割的两个流场分别由三维流动求解器计算,并用激盘边界条件连接。计算结果表明,使用激盘模型可以模拟出非轴对称背压下透平叶栅内

的流动,同时能考虑到排气蜗壳非轴对称流场对透平的影响,从而获得较准确的透平出口流场;但由于模型本身的限制,无法获取透平叶栅通道内部的流场信息^[17]

4 结论与展望

(1) 排气蜗壳内部存在复杂的涡系,其大部分流动损失来自通道涡;排气蜗壳的内外导流环处都存在流动分离,复杂的涡系结构和流动分离现象都会很大程度上降低排气蜗壳的性能。

(2) 涡轮与排气蜗壳之间复杂的流动相互作用对于排气蜗壳的性能研究和设计改型至关重要。其中,末级涡轮对下游排气蜗壳扩压器的影响主要体现在扩压器入口的旋流角、动叶叶顶间隙泄漏流和出口总压分布等因素上。在以后的研究与设计当中,应当充分考虑上述的入口条件影响。

(3) 在非定常耦合研究中得知,排气蜗壳产生的非对称压力会逐渐向上游传播到涡轮出口,最终会导致每个涡轮叶片上的负载发生变化;排气蜗壳产生的非轴对称流场对叶片非定常力的影响远大于叶片排相互作用的影响;

(4) 在耦合排气蜗壳与轴流涡轮的研究方面,主要采用的方法有混合平面法、冻结转子法、非线性谐波法和数值激盘模型 4 种。这几种方法各有优缺点,如混合平面法减小了计算量但无法捕捉周向参数的不均匀性;冻结转子法提高了结果精确度的同时也带来了计算资源增加的问题;而数值激盘模型法无法获取透平叶栅通道内部的流场信息,非线性谐波法虽然能在捕捉更多流场细节的同时降低计算量,但其应用于排气蜗壳模型的计算时准确性还未得到足够的试验验证。以上方法中非线性谐波法和数值激盘模型还未得到广泛采用。在今后的耦合研究中,只考虑单个静叶的冻结转子法和非线性谐波法在综合考虑高精度和底计算量方面可视为全周叶片冻结转子法可行的替代方案。

关于排气蜗壳与末级轴流涡轮之间流动相互作用问题依然需要进一步的研究,今后研究的内容包括:

(1) 单独对于排气蜗壳流动和损失的研究已经比较常见,但是对于二者流动相互作用的耦合研究

还比较少见;此外,部分耦合研究文献中关于扩压器进口条件,如进口气流雷诺数、马赫数和湍流度的影响还没有完整的研究结论,应当加以考虑;以上部分研究忽略了排气蜗壳内部的加强部件(如支板)对性能的影响,这些条件未来都应该加以充分考虑。

(2) 由于计算条件的限制,对于流动相互作用非定常的研究非常少,对于排气蜗壳与涡轮相互作用耦合的数值模拟目前还没有最佳方法。因此系统的非定常研究仍是未来研究的重点,而在综合考虑计算结果精确度和降低计算量的前提下寻找合适的非定常计算方法也是今后研究的重要内容。

参考文献:

- [1] FAROKHI S. A trade-off study of rotor tip clearance flow in a turbine/exhaust diffuser system [C]//ASME International Gas Turbine Conference and Exhibition. 1987.
- [2] 莫政宇. 船用燃气轮机排气蜗壳数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.
MO Zheng-yu. Numerical simulation of the marine gas turbine exhaust volute [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2002.
- [3] 霍文举. 田口方法优化设计透平排汽缸的应用 [J]. 汽轮机技术, 1993 (1): 50 - 57.
HUO Wen-ju. Application of taguchi method to optimize the design of turbine exhaust hood [J]. Turbine Technology, 1993 (1): 50 - 57.
- [4] UBERTINI S, DESIDERI U. Experimental performance analysis of an annular diffuser with and without struts [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2000, 22 (3 - 4): 183 - 195.
- [5] TANUMA T, SASAO Y, YAMAMOTO S, et al. Numerical investigation of exhaust diffuser performances in low pressure turbine casings [C]//ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference & Exposition, 2011.
- [6] BURTON Z, INGRAM G L, HOGG S. A literature review of low pressure steam turbine exhaust hood and diffuser studies [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2013, 135 (6): 062001.1 - 062001.10.
- [7] GAO Jie, TAO Chun-de, HUO Dong-cheng, et al. Advances in coupled axial turbine and nonaxisymmetric exhaust volute aerodynamics for turbomachinery [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering, 2020: 095441002096645.
- [8] FU Jing-lun, LIU Jian-jun. Investigations of influential factors on the aerodynamic performance of a steam turbine exhaust system [C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and

- Air. 2010.
- [9] 程云生,全晓军,章任蕾. 汽轮机低压排汽缸气动性能的数值研究[J]. 汽轮机技术,2010,52(5):359-362.
- CHENG Yun-sheng, QUAN Xiao-jun, ZHANG Ren-lei. The numerical investigation of steam turbine low-pressure exhaust hood aerodynamic performance[J]. Turbine Technology, 2010, 52(5): 359-362.
- [10] 宋 震,胥建群,孙利鹏. 汽轮机低压排汽缸内流场的数值模拟研究[J]. 汽轮机技术,2014(5):351-353.
- SONG Zhen, XU Jian-qun, SUN Li-peng. Numerical simulation of the low-pressure exhaust hood of steam turbine[J]. Turbine Technology, 2014(5): 351-353.
- [11] BURTON Z, GRANT, et al. Efficient methods for predicting low pressure steam turbine exhaust hood and diffuser flows at design and off-design conditions[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(8): 82601-82601.
- [12] XU Xu, KANG Shun, HIRSCH C. Numerical simulation of the 3D viscous flow in the exhaust casing of a low-pressure steam turbine[C]//ASME Turbo Expo 2001: Power for Land, Sea, and Air. 2001.
- [13] 徐 旭,康 顺,蒋洪德. 低压蒸汽透平排汽缸内能量损失的数值研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(6): 652-655.
- XU Xu, KANG Shun, JIANG Hong-de. Numerical simulation of 3D viscous flow in exhaust casing of a low-pressure steam turbine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(6): 652-655.
- [14] ZHANG W, PAIK B G, JANG Y G, et al. Particle image velocimetry measurements of the three-dimensional flow in an exhaust hood model of a low-pressure steam turbine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129(2): 411-419.
- [15] OWCZAREK J A, WARNOCK A S, MALIK P. A low pressure turbine exhaust end flow model study[C]//ASME 1989 Joint Power Generation Conference, 1989.
- [16] TINDELL R H, ALSTON T M, SARRO C A, et al. Computational fluid dynamics analysis of a steam power plant low-pressure turbine downward exhaust hood[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, 118(1): 214-224.
- [17] FAN Tao, XIE Yong-hui, ZHANG Di, et al. A combined numerical model and optimization for low pressure exhaust system in steam turbine[C]//ASME 2007 Power Conference. 2007.
- [18] LIU Jian-jun, JIANG Hong-de. Investigation of flow in a steam turbine exhaust hood with/without turbine exit conditions simulated[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME, 2003, 125(1): 292-299.
- [19] 付文锋,刘 康,周兰欣. 耦合末级的 1 000 MW 汽轮机排汽通道数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2017(16): 4722-4730.
- FU Weng-feng, LIU Kang, ZHOU Lan-xing. Numerical simulation of the exhaust passage coupling with last stage in a 1 000 MW steam turbine[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2017(16): 4722-4730.
- [20] 付经伦. 轴流透平级与非轴对称排汽系统非定常相互作用研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2007.
- FU Jing-lun. Investigation of unsteady interaction between axial turbine and non-axisymmetric exhaust system[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences(Institute of Engineering Thermophysics), 2007.
- [21] SONG Zheng, XU Jian-qun, SUN Li-peng et al. Study of coupling numerical flow field simulation of low-pressure last stage exhaust passage in steam turbine[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 672-674: 1626-1632.
- [22] BENIM A C, GEIGER M, DOEHLER S, et al. Modelling the flow in the exhaust hood of steam turbines under consideration of turbine-exhaust hood interaction[C]//First European Conference on Turbomachinery-Fluid Dynamic and Thermodynamic Aspects, 1995.
- [23] MUSCH C, STUEER H, HERMLE G. Optimization strategy for a coupled design of the last stage and the successive diffuser in a low pressure steam turbine[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(1): 011013.1-011013.7.
- [24] 徐自荣,袁 浩,初 鹏,等. 入口旋流角对排气扩压段气动性能影响的数值研究[J]. 燃气轮机技术, 2018, 31(1): 30-34.
- XU Zi-rong, YUAN Hao, CHU Peng, et al. Numerical investigation of the impact of inlet swirl on the performance of gas turbines exhaust diffusers[J]. Gas Turbine Technology, 2018, 31(1): 30-34.
- [25] ŠTASTNÝ M, ŠKODA, et al. 3D flow in the axial-radial exhaust hood of a steam turbine[J]. Journal of Thermal Science, 1997.
- [26] ŠTASTNÝ M, TAJC L, KOLÁR P, et al. Effects of inlet swirl on the flow in a steam turbine exhaust hood[J]. Journal of Thermal Sciences, 2000, 9(4): 327-333.
- [27] VLADIMIR V, STEFAN I, CLARIDGE M, et al. Experimental and numerical investigation of the impact of swirl on the performance of industrial gas turbines exhaust diffusers[C]//ASME Turbo Expo, Collocated with the International Joint Power Generation Conference. 2003.
- [28] VLADIMIR V, STEFAN I, SAMER A, et al. Impact of the inflow conditions on the heavy-duty gas turbine exhaust diffusers performance[C]//ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 2010.

- [29] MCDONALD A, FOX R, DEWOESTINE R. Effects of swirling inlet flow on pressure recovery in conical diffusers[J]. AIAA Journal, 1971, 9(10): 2014–2018.
- [30] KUMAR D S. Effect of swirl on pressure recovery in annular diffusers[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2006.
- [31] FU J, LIU J, ZHOU S. Experimental and numerical investigation of interaction between turbine stage and exhaust hood[J]. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part A-Journal of Power and Energy, 2007, 221(7): 991–999.
- [32] FLEIGE H U, RIESS W, SEUME J. Swirl and tip leakage flow interaction with struts in axial diffusers[C]//ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 2002.
- [33] 付经伦, 陈川, 刘建军. 进口漩流对透平排汽缸内部流动的影响[J]. 工程热物理学报, 2007(S1): 73–76.
FU Jing-lun, CHEN Chuan, LIU Jian-jun. Influences of inlet swirl on non-axisymmetric flows in turbine exhaust hoods[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007(S1): 73–76.
- [34] OPILAT V, SEUME J R. The effect of the operating conditions of the last turbine stage on the performance of an axial exhaust diffuser[C]//ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, 2011.
- [35] 董雨轩, 李志刚, 李军. 预旋对燃气涡轮排气蜗壳气动性能影响的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(1): 116–124.
DONG Yu-xuan, LI Zhi-gang, LI Jun. Effect of preswirl on the aerodynamic performance of the gas turbine exhaust volutes[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(1): 116–124.
- [36] LIU Jian-jun, HYNES T. The investigation of turbine and exhaust interactions in asymmetric flows; part 2—turbine-diffuser-collector interactions[C]//ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air, 2002.
- [37] LIU Jian-jun, HYNES T P. The investigation of turbine and exhaust interactions in asymmetric flows; part 1—blade-row models applied[C]//ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2002.
- [38] 高杰, 郑群, 岳国强, 等. 燃气轮机涡轮叶顶间隙气热技术研究进展[J]. 航空学报, 2017, 38(9): 71–101.
GAO Jie, ZHENG Qun, YUE Guo-qiang, et al. Research progress on turbine blade tip aerodynamics and heat transfer technology for gas turbines[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2017, 38(9): 71–101.
- [39] DAVID K, WIEDERMANN A, VOLGMANN W. Impact of gas turbine outflow on diffuser performance; a numerical study[C]//ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air, 2004: 111–119.
- [40] FINZEL C, SCHATZ M, CASEY M V, et al. Experimental investigation of geometrical parameters on the pressure recovery of low pressure steam turbine exhaust hoods[C]//ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, 2011.
- [41] TANUMA T, SASAO Y, YAMAMOTO S, et al. Numerical investigation of three-dimensional wet steam flows in an exhaust diffuser with non-uniform inlet flows from the turbine stages in a steam turbine[C]//American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [42] LI Jun, LI Zhi-gang, FENG Zhen-ping. Effects of the last stage rotor tip leakage flow on the aerodynamic performance of the exhaust hood for steam turbines[C]//ASME Paper No. GT2013–94377, 2013.
- [43] 史立群, 杨建道, 杨锐, 等. 耦合末级叶片的汽轮机排汽缸气动数值模拟[J]. 动力工程学报, 2011(9): 655–658.
SHI Li-qun, YANG Jian-dao, YANG Rui. Numerical simulation on aerodynamic performance of steam turbine exhaust hood coupling last stage blade[J]. Power Engineering, 2011(9): 655–658.
- [44] 吴飞, 戴斌, 艾松, 等. 透平末级动叶顶部间隙变化对排气扩压器气动性能的影响[J]. 东方汽轮机, 2017, 148(4): 26–31.
WU Fei, DAI Bin, AI Song, et al. Influence of last stage rotor tip clearance variation on aerodynamic performance of exhaust diffuser[J]. Dangfang Turbine, 2017, 148(4): 26–31.
- [45] FU Jing-lun, LIU Jian-jun. Influences of inflow condition on non-axisymmetric flows in turbine exhaust hoods[J]. Journal of Thermal Science, 2008, 17: 305–313.
- [46] SOLODOV V G, GNESIN V I. Three-dimensional simulation of nonstationary flow phenomena in “Last stage-exhaust hood” compartment[J]. Journal of Thermal Science, 1997, 6(4): 231–236.
- [47] GAO Jie, LIN Feng, NIU Xi-yin, et al. Flow interactions between shrouded power turbine and nonaxisymmetric exhaust volute for marine gas turbines[C]//ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. 2017; V001T25A001.
- [48] FU J L, LIU J J, Zhou S J. Unsteady interactions between axial turbine and nonaxisymmetric exhaust hood under different operational conditions[J]. Journal of Turbomachinery-Transactions of the ASME, 2012, 134(4): 041002.
- [49] BURTON Z, HOGG S, INGRAM G I. The influence of inlet asymmetry on steam turbine exhaust hood flows[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013.
- [50] BURTON Z, INGRAM G, HOGG S. A novel method of coupling the steam turbine exhaust hood and the last stage blades using the non-linear harmonic method[C]//ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. 2013.
- [51] 黄恩德. 轴流式涡轮排气蜗壳内部流动机理及优化设计研究[D]. 西安: 西北工业大学.
HUANG En-de. Investigation on flow mechanism and optimal de-

- sign methods of an axial turbine exhaust volute [D]. Xi'an: North-western Polytechnical University.
- [52] TINDELL R, ALSTON T. A comparison of two methods for utilizing steam turbine exhaust hood flow field data [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1992, 114 (2): 398 – 401.
- [53] LIU Xue-yi, LIU mIN, SUN Hai-ou, et al. Numerical simulation of the flow field of a naval gas turbine exhaust volute [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2000.
- [54] VASSILIEV V, IRMISCH S, FLORJANCIC S. CFD Analysis of industrial gas turbine exhaust diffusers [C]//ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2002.
- [55] VOLKMER S, SCHATZ M, CASEY M, et al. Prediction of flow in an exhaust gas turbine diffuser with a scale-adaptive simulation model [C]//ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, 2013.
- [56] 樊 涛, 谢永慧. 汽轮机排汽通道复杂流动数值研究的现状与进展 [J]. *热力透平*, 2007 (3): 143 – 149.
FAN Tao, XIE Yong-hui. Review and prospect for numerical study on the complicated flowfield of steam turbine exhaust hood [J]. *Thermal Turbine*, 2007 (3): 143 – 149.
- [57] DENTON J D. The calculation of three-dimensional viscous flow through multistage turbomachines [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1992, 1 (1): 18 – 26.
- [58] 祝 昭. 转/静交界面处理方法研究及涡轮结构与气动分析 [D]. 南京: 航空航天大学, 2008.
ZHU Zhao. Investigation on rotor/stator interface processing method and analysis on configuration and aerodynamic of turbine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [59] 柴家兴, 马国骏, 高 杰, 等. 进、排气蜗壳对全流道大膨胀比涡轮性能影响研究 [J]. *推进技术*: 1 – 11 [2020 – 09 – 06] <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.190674>.
CHAI Jia-xing, MA Guo-jun, GAO Jie, et al. Study on influence of the performance of full-flow large expansion ratio turbine with inlet and exhaust casings [J]. *Journal of Propulsion Technology*: 1 – 11 [2020 – 09 – 06] <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.190674>.
- [60] VERSTRAETE T, PRINSIER J, SANTE A D, et al. Design optimization of a low pressure steam turbine radial diffuser using an evolutionary algorithm and 3D CFD [C]. *ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*, 2012.
- [61] LI Z, LI J, YAN X, et al. Investigations on the flow pattern and aerodynamic performance of last stage and exhaust hood for large power steam turbines [C]//ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition, 2012.
- [62] HE L, NING W. Efficient approach for analysis of unsteady viscous flows in turbomachines [J]. *AIAA Journal*, 1998, 36 (11): 2005 – 2012.
- [63] LIU Jian-jun, HYNES T P. The investigation of turbine and exhaust interactions in asymmetric flows—blade-row models applied [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2003, 125 (1): 121 – 127.

(金圣迪 编辑)