

汽轮机排汽缸的气动研究进展

李殿玺, 樊 轶, 金洁敏, 林志鸿

(哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘 要: 汽轮机排汽缸是连接凝汽式汽轮机末级出口至冷凝器的通道, 改善其气动性能可提高汽轮机的效率。本文从数值分析及试验两方面对排汽缸的研究进行了分析, 并对提高气动性能的新型措施进行了归纳。分析表明: 末级与排汽缸湿蒸气汽液两相流的联合数值分析是排汽缸流场数值分析的发展方向; 模型试验是排汽缸研究的主要方法, 由于进口气流对排汽缸性能的影响敏感, 进口流场应反映末级出口气流的真实状况, 并要特别注意叶栅顶部出口气流的模拟。提高排汽缸气动性能的新型措施为: 采用具有负超高的扩压器和非对称扩压器; 中分面布置轴向栅格型涡阻尼器; 采用除湿措施, 减少湿度损失; 冷凝器喉部结构及加强系统的改进。

关 键 词: 汽轮机; 排汽缸; 气动; 数值分析; 模型试验

中图分类号: TK263.1

文献标识码: A

1 前 言

凝汽式汽轮机在电站及船舶运输中有着广泛的应用, 为节省能耗、提高经济性, 人们一直在努力提高汽轮机的效率。排汽缸是连接凝汽式汽轮机末级出口至冷凝器的通道, 主要作用是把低压缸末级叶栅出口的余速动能转化为压力能, 在冷凝器真空度给定的条件下, 降低末级叶栅出口截面处的静压, 可增加汽轮机的配置焓降, 提高汽轮机组的热效率。

大功率汽轮机低压缸末级叶栅出口平均绝对马赫数为 0.5~0.8, 其余速动能约占机组总焓降的 1.5%, 如果能有效地回收、利用这部分余速动能, 可使机组热效率提高 1%, 效益可观。因此, 排汽缸气动性能的提高是提高汽轮机效率的重要途径。

排汽缸结构复杂。因受其所在位置的限制, 一般采用环形进汽、向下排汽, 其内往往含有轴承箱、扩压器、导流板以及为提高刚性而采取的加强筋、柱等结构, 形成复杂的内部结构。旋涡运动为排汽缸内三维流动的主要特征, 也是气动损失的主要来源。排汽缸的气动性能受扩压器、排汽涡壳的几何形状, 导流板、加强件的几何及布置方式, 以及来流条件等多种因素的影响, 气动性能的研究比较困难。多年来, 人们就这一课题开展了多方面的研究, 提出了一系列的改进方法。

2 国内外的研究现状

2.1 排汽缸流场的数值分析

随着计算机及计算流体力学的发展, 排汽缸流场的数值计算方法逐渐成熟, 计算结果越来越接近实际, 成为排汽缸研究的重要方法。1991 年 Tindell R. H. 等人进行了 L-1、S-2 两种导向器(见图 1)排汽缸流场的数值分

析^[1], 计算模型如图 2 所示。边界条件采用均匀与反映末级出口流场的非均匀条件, 计算表明: (1) 是否考虑进口速度、总压的变化, 其结果将有重大差异, 不只性能发生变化, 所计算结构的相对价值也会发生变化; (2) S-2 导流结构更适应高背压涡轮出口特点; (3) 排汽缸的气动性能对末级出口气流的变化具有很大的敏感性。

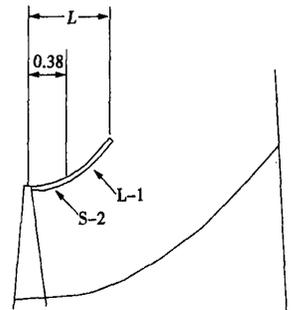


图 1 两种导向器示意图

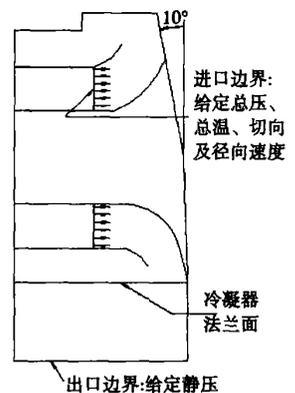


图 2 计算模型示意图

刘建军利用专用三维流场计算程序^[2], 计算了国产 300/600 MW 汽轮机低压排汽系统的气动性能。进口边界给定总温、总压、切向和径向气流角的二维分布, 出口边界处给定平均静压, 壁面假定绝热、无滑移。在均匀及畸变来流两种条件下, 计算了国产 300/600 MW 汽轮机低压排汽系统的气动性能, 发现均匀来流下气动性能良好的排汽系统在畸变来流下严重恶化(见图 3 和图 4), 总压损失系数由 38.6% 提高到 69.7%, 静压恢复系数由 22.7% 降到 -22.5%; 通过结构的改进, 获得了畸变来流条件下气动性能得到提高的排汽系统(见图 5), 总压损失系数由 38.6% 降到 27.6%, 静压恢复系数由 22.7% 提高到 37.9%。

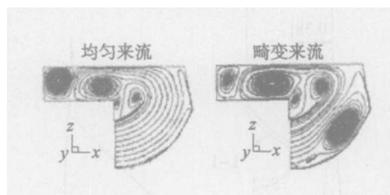


图 3 两种来流条件下原设计排汽系统 $\theta=0^\circ$ 截面处的迹线

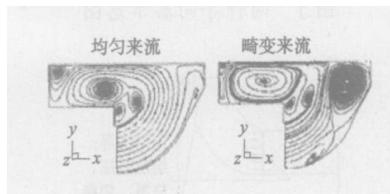


图 4 两种来流条件下原设计排汽系统 $\theta=90^\circ$ 截面处的迹线

为更准确地模拟排汽缸的进口条件, 文献[3~4]提出了激励盘模型, 并用于汽轮机末级和排汽缸的计算。激励盘模型将叶栅简化为一零厚度盘面, 流动参数在这一盘面上发生跳跃, 从进口参数跳跃到出口参数。

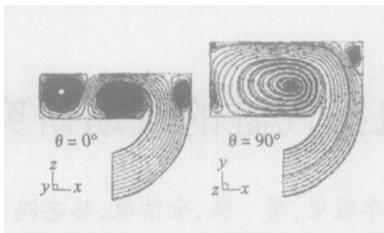
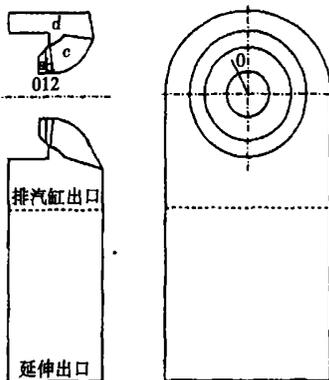


图 5 畸变来流条件下新设计排汽系统 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 截面处的迹线

计算模型如图 6 所示。采用进口、出口及激励盘边界条件, 进口根据通流计算采用均匀总压、均匀总温, 指定径向变化的切流角和径流角; 排汽缸出口进行了延伸, 并给定平均静压; 静叶、动叶采用激励盘边界条件, 切流角、总压损失系数根据通流计算给定。计算表明: (1) 使用激励盘模型模拟非对称涡轮叶栅流动是有效的, 且该模型可处理穿越激励盘的回流; (2) 排汽系统内的流动受各种涡的控制。扩压器内涡阻塞是排汽系统压力恢复能力降低的关键因素; (3) 集汽室及扩压器内的涡是排汽缸呈现高的总压损失的主要原因。



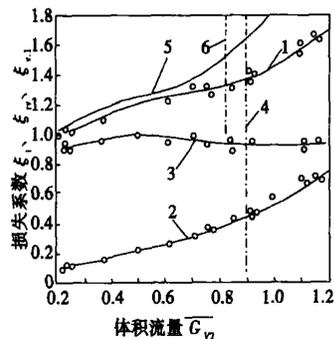
0—末级进口; 1—静叶; 2—动叶

图 6 非对称排汽计算模型

数值计算研究具有周期短, 成本低的优点, 且随着计算技术及计算机的发展, 计算精度也越来越高, 适合进行排汽缸结构设

计的性能评估及方案优选, 在排汽缸研究中作用日益突出。文献[5]采用数值计算的方法, 进行了排汽缸 8 个结构参数、3 个因素水平的 $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ 正交表的计算, 获得了优化的排汽缸结构; 进行了原始方案、双层、三层扩压管排汽缸的气动性能对比, 双层扩压管排汽缸气动性能最优(压损 0.6495); 船用汽轮机由于空间的限制, 往往不设扩压器, 结构参数较少。作者对某船用汽轮机排汽缸进行了 4 个结构参数、3 个因素水平共 9 种方案的筛选, 气动损失系数从原方案的 1.1 降到优选方案的 0.66, 获得了较好的效果。

2.2 排汽缸的试验研究



K-300-240 汽轮机: 1—总压损失 ξ_t ; 2—余速损失 ξ_n ; 3—内部损失 $\xi_{i,1}$; 4— $\overline{G_{vc}} = 1.0$; K-800-240-3 汽轮机: 5—总压损失 ξ_t ; 6— $\overline{G_{vc}} = 1.0$

图 7 排汽缸特性与流量的关系

排汽缸试验分全尺寸试验及模型试验两种。全尺寸试验是进行排汽缸的 1:1 实际机组的试验研究, 但由于成本高, 此类试验数量不多, 仅举一例。文献[6]报道, 1984 年前苏联在改型的 K-300-240、K-800-240 低压汽轮机上进行了排汽缸及末级的试验。研究表明末级加装围带, 可消除非扭曲的羽状流, 平整气流及速度的分布, 降低末级余速损

失, 且排汽缸的损失也减小。图 7 为部分试验结果, 显示出虽总压及余速损失随流量增加, 但内部损失几乎不变。

模型试验在排汽缸研究中使用最多, 结合数值计算, 具有结果可靠、成本低、周期短的优势, 是排汽缸研究的主要方法。

大功率汽轮机排汽缸一般配置扩压器, 某些汽轮机排汽缸由于轴向长度较短, 实施困难, 往往不采用扩压器, 试验证明这是不明智的^[7]。文献[8]根据试验总结了排汽缸几何尺寸对其气动性能的影响规律, 提出了扩压器设计宜遵循扩散时少转弯、转弯时少扩散的设计原则, 提供了针对末级径高比 3.5~4.2 时扩压器设计的参考数据。文献[9]进行了扩压器壁面防分离措施的研究, 证实壁面纵向开槽对防止气流分离非常有效。茅声凯提出了包括排汽涡壳在内的正交试验法^[10], 归纳了扩压器性能、排汽缸涡壳性能与几何参数的关系, 为排汽缸的优化研究提供了指导。

叶顶、叶根区域的流动与主流区差距很大, 叶顶为超音速流动, 叶根为低速流动, 限制了扩压器效果的发挥, 导致排汽缸的实际损失比模型试验大。鉴于此, 创造性地提出了一种具有负超高的轴径式扩压器(见图 9)。图 10 和图 11 表明, 在均匀及不均匀进口条件下, 负超高扩压器都使排汽缸的气动性能提高, 不均匀进口条件下气动性能提高更多, 且进口气流速度的适应范围也得到了提高。

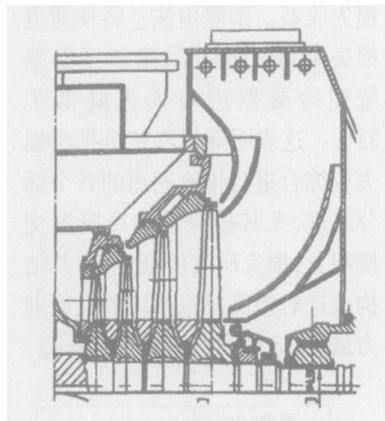


图 9 位于低压缸的通流部分、相对于末级叶片以负超高设置扩压器

试验, 从图 12 试验结果可看出非对称扩压器使排汽缸气动性能大幅度地提高。

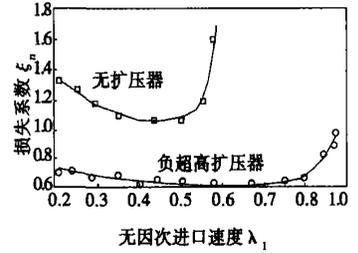


图 11 不均匀的进口速度场条件下排汽缸总压损失系数 ξ_n 与无因次进口速度 λ_1 的关系

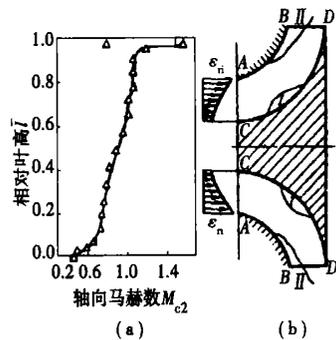


图 8 在没有围带时末级后轴向分速度的分布和在轴径式扩压器进口截面处的速度分布

排汽缸扩压器损失受进口条件的影响, 文献[11]测出了某汽轮机末级的速度分布(见图 8)。

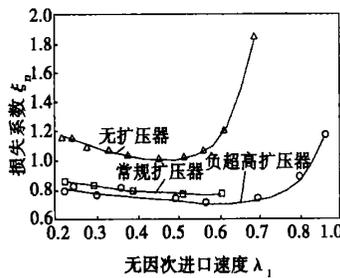


图 10 均匀进口速度场条件下排汽缸总压损失系数 ξ_n 与无因次进口速度 λ_1 的关系

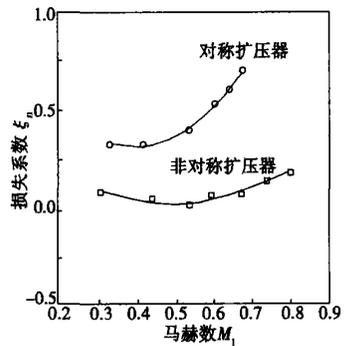


图 12 排汽缸两种扩压器方案的气动性能

排汽缸结构是上下不对称的, 而扩压器一般是对称的, 文献[12]提出了一种非对称的扩压器, 并与对称扩压器进行了对比

排汽缸内存在着强烈的涡流动, 是气动损失产生的主要原因, 须采取防止措施。涡流动形成过程的分析表明, 排汽缸的中分面是涡流动形成的起始位置, 可在此处防止或破坏涡流束的形成及传播。文献[13]进行了涡阻尼的研究, 进行了排汽缸的中分面 3 种形式的阻尼器(见图 13)对比试验研究, 研究表明 2 号轴向栅格型阻尼器效果最好, 排汽缸振动水平急剧降低, 总损失系数降低了 5%~7%。明显拉平了冷凝器进口速度场的分布, 冷凝器水分返流到末级叶栅出气边的可能性降到最小。

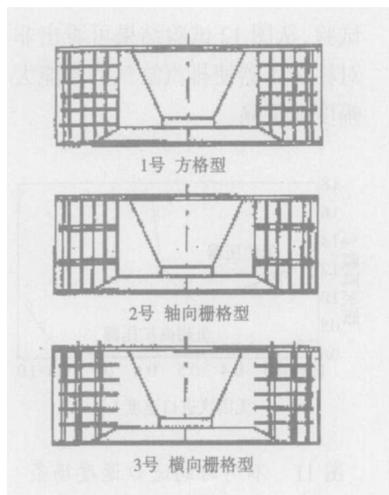


图 13 排汽缸中分面的平板型涡阻尼器

俄罗斯 V. F. Kasilov 等人进行了排汽缸湿蒸气汽液两相流动的试验研究^[14]，除满足常规气动试验准则外，还确保了湿度、液相粒度及大水滴组分与实际相同。试验结果如图 14 所示，分析了排汽缸内的汽液两相流动过程，提出了适合于平衡过程的如下排汽缸损失公式：

$$\xi_{tw} = \xi_{t0} + 0.1 \frac{\sum |\Delta x|}{x_2} \times \frac{r_s}{\Delta H_{ov}} = \xi_{t0} + \Delta \xi'_{tw} \quad (1)$$

其中： ξ_{t0} —只有汽相时的气动损失系数； $\sum |\Delta x|$ —汽液两相间相互作用引起的湿度变化绝对值总和； r_s —液相汽化潜热； ΔH_{ov} —排汽缸入口动能； $\Delta \xi'_{tw}$ —液相产生的附加损失系数。

对于具有优良气动性能的排汽缸 ($\xi_{t0}=0.7 \sim 0.8$)，考虑蒸汽湿度对损失的影响是有意义的。设计中在排汽缸(尤其上半部)积极采用除湿手段是可取的。可采取内表面安装捕捉槽和环型壳体进口截面安装捕捉槽以限制叶顶上部高湿度气流喷射的方法。另一有效方法为排汽缸集汽室角部安装多孔板，以从旋涡中去湿。

降低汽轮机排汽损失需综合考虑，E. I. Guckov 等人对某短轴向尺寸排汽系统结构加强引起的损失分布进行了研究^[7]。假设加强系统总损失 100%，扩压器加强占 17%，排汽缸壳体加强占 14%，冷凝器入口加强占 19%，最大发生在排汽缸与冷凝器的过渡段，份额 50%。汽缸与冷凝器的过渡段达一半的损失发生在法兰加工或其它原因产生的内法兰上。通过复合加强系统取代原有棒状系统会获得 13%~17% 的损失收益。消除内法兰将使通道损失降低 11%。采用新型肋系统使冷凝器进口损失降低了 35%。这表明降低汽轮机排汽损失应综合进行排汽通道的各个部分改进，尤其排汽缸与冷凝器交接部分，损失所占份额最大，其结构改进对提高排汽系统的性能潜力最大，应加强这一部分的研究。

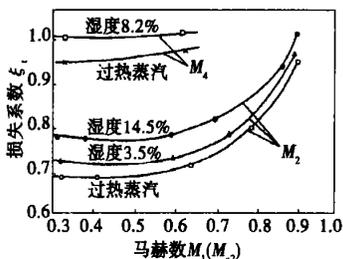


图 14 M_2 、 M_4 模型损失与湿度、马赫数关系曲线

3 排汽缸研究展望

目前人们主要依托数值计算与模型试验进行排汽缸的研究。由于计算机和计算技术的发展，数值计算越来越接近实际，可比较真实地按排汽缸的内部结构进行数值分析，进口条件也比较真实，能够反映末级气流对排汽缸气动性能的影响。研究表明，排

汽缸气动性能对末级出口气流状况敏感。末级与排汽缸湿蒸气汽液两相流的联合数值分析是排汽缸流场数值分析的发展方向。

模型试验是排汽缸研究的主要方法，由于进口气流对排汽缸性能的影响敏感，进口流场应反映末级出口气流的真实状况，并要特别注意叶栅顶部出口气流的模拟。研究应将模型试验、数值计算结合进行，模型试验验证数值计算方法，数值分析进行方案优选，并对最终方案进行模型试验验证。

目前排汽缸的强度与气动问题是分开进行研究的，开展排汽缸汽液两相流场、强度、振动的耦合数值分析研究，是排汽缸数值分析的发展方向。

4 结束语

数值分析及模型试验的多项研究表明，排汽缸的气动性能主要受结构、进口气流以及湿度的影响。为提高气动性能，可采取的新型结构及措施为：(1)采用具有负超高的扩压器；(2)采用非对称扩压器；(3)中分面布置轴向栅格型涡阻尼器；(4)采用除湿措施，减少湿度损失；(5)冷凝器喉部结构及加强系统的改进。由于主要是针对电站汽轮机提出，且未在实际中得到推广应用，今后应综合运用数值分析及模型试验研究，使其尽快在汽轮机行业中得到推广；对于船舶汽轮机，排汽缸一般轴向长度较短并具有倒车级，负超高扩压器不适用，应进一步开展工作，使后 4 种措施在具体的工程设计中得到应用。

参考文献：

[1] TINDELL R H, SARRO C A. Computational fluid dynamics analysis of a steam

- power plant low pressure turbine downward exhaust hood[J]. **Design Repair and of Steam Refurbishment Turbine ASME**, 1991, **13**: 43—49.
- [2] 刘建军, 蒋洪德. 汽轮机低压排汽系统气动性能分析[J]. **工程热物理学报**, 2002 **23**(4): 425—428.
- [3] LIU JIAN JUN. Numerical simulation of asymmetric exhaust flows using an actuator disc blade row model[J]. **Computational Technologies for Fluid/Thermal/Structural/Chemical Systems With Industrial Applications**, ASME, 2002, **448**(2): 207—213.
- [4] LIU J J, HYNES T P. The investigation of turbine and exhaust interactions in asymmetric flows-blade-row models applied [J]. **Journal of Turbomachinery**, 2003 **125**: 121—127.
- [5] 杜占波, 张迪, 孙弼. 汽轮机低压排汽缸结构优化设计分析系统及其应用[J]. **汽轮机技术**, 1999 **41**(6): 325—329.
- [6] IAGUN V P, SIMOYU L L, NAKHMAN Yu V, *et al.* Power characteristics of the exhaust of the modified low-pressure cylinder of the K-300-240 and K-800-240 turbines [J]. **Thermal Engineering**, 1984, **31**(4): 26—32.
- [7] GUDKOV E I, KONEV V A, BASOV V A. Aerodynamic feature of the exhaust circuits of low-pressure cylinders with hoods of small axial length[J]. **Thermal Engineering**, 1990, **37**(5): 237—240.
- [8] 陈洪溪, 薛沐睿. 大型空冷汽轮机低压排汽缸几何尺寸对气动性能的影响[J]. **动力工程**, 2003 **23**(6): 2740—2743.
- [9] JIRI LINHART, MICHAL HOZNEDL. Properties and improvements of flow in steam turbine exhaust hood[A]. **Proceedings of International Conference on Energy and the Environment**[C]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2003. 453—460.
- [10] MAO S K, WEI Y Z, MAY Y L. Aerodynamic characteristic optimization of an axial turbine exhaust hood by tests based on an orthogonal design approach[A]. **Gas Turbine Conference and Exhibition** [C]. USA: ASME, 1987. 1—6.
- [11] ЗАРЯНКИН А Е, СИМОНОВ Б П, ПАРАМОНОВ А Н. Аэродинамическое совершенствование выхлопных патрубков турбомашины[J]. **Термодинамика**, 1998(1): 20—24.
- [12] 川岸裕之, 坂本太郎. 汽轮机排汽缸的性能与流动解析[J]. **夕一水机械**, 1994, **22**(9): 540—546.
- [13] ZARYANKIN A E, PARAMONOV A N, CHUSOV S I, *et al.* Methods for dampening vortex flows and experience in using vortex dampers[J]. **Thermal Engineering** 2000, **47**(11): 978—983.
- [14] KASILO V F, SHARKOV A V. Evaluating the effect of steam wetness on the efficiency of the exhaust hoods of the low-pressure cylinders of steam turbines[J]. **Thermal Engineering** 2004, **51**(5): 378—383.

(渠源 编辑)

新技术 新产品

Alstom 将改进卡拉威核电站的汽轮机

据《Turbomachinery International》2005年7~8月号报道,位于美国密苏里州Callaway County的Callaway核电站将在2005年9月升级改进它的汽轮机,并更换它的蒸汽发生器。

卡拉威核电站于1985年投入运行,具有标准的核动力装置系统,使用1座西屋公司的四回路压水堆和1台GE公司的汽轮发电机组。汽轮机的输出功率是1250MW,装置净输出功率为1126MW。进口蒸汽条件是280℃、6.65MPa,湿度为0.5%。

改进内容包括高压转子和3个低压转子以及低压内汽缸。增加低压排汽面积,以便匹配实际的冷凝器性能。Alstom将用焊接转子更换原来的低压转子,以避免应力腐蚀裂纹。

经过升级改进后,该汽轮机的输出功率将增加3%以上,新部件的寿命将超过20年。

(吉桂明 供稿)

基于三角形单元体的构形理论经济学研究 = **Economics Study of Configuration Theory Based on Triangular Elements** [刊, 汉] / ZHOU Sheng-bing, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (Department of Power Enging, Naval University of Engineering, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21 (5). — 441 ~ 444

Based on a configuration theory and first of all with triangular elements serving as an object of study along with a release of angle constraint, an economic analysis was conducted of a given area for the purpose of minimizing total freight charges. On this basis, the triangular elements were assembled into new rectangular configuration entities and then a same analysis was performed. A similar endeavor was kept up until a complete analytic solution had been obtained. A comparison of the optimization results with those available in relevant literature shows that the economic optimization conducted for the given area by using triangular elements would result in even lower freight charges. Moreover, when various transportation channels are no longer perpendicular to one other and a continual optimization of their included angle is pursued, the freight charges will be further reduced. It has been found that the use of triangular elements for performing an economic optimization along with a release of angle constraint can result in even lower freight charges. **Key words:** configuration theory, economics, triangular elements, generalized thermodynamics optimization

汽轮机排汽缸的气动研究进展 = **Recent Advances in the Study of Aerodynamic Performance of Steam Turbine Exhaust Hoods** [刊, 汉] / LI Dian-xi, FAN Yi, JIN Jie-min, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21 (5). — 445 ~ 449

The exhaust hood of a steam turbine is a passage for connecting the outlet of the last stage of a condensing type steam turbine with its condenser. To improve its aerodynamic performance can lead to a higher efficiency of the steam turbine. An analysis is conducted of the study of exhaust hoods from the following two aspects: numerical analysis and experiments. In addition, innovative measures to enhance the aerodynamic performance of exhaust hoods are also summarized. It has been found through the analysis that a joint numerical analysis of wet steam gas-liquid two-phase flow in the last stage and exhaust hoods represents the current development trend of numerical analysis of flow fields in exhaust hoods, and model experiments are the main methods for the study of exhaust hoods. As the performance of exhaust hoods is greatly influenced by inlet steam flows, the inlet flow field should reflect the actual conditions of the last stage outlet flows. Moreover, special attention should be paid to the simulation of outlet steam flows on top of the cascade. The innovative measures to improve the aerodynamic performance of exhaust hoods can be given as follows: adoption of a diffuser with a negative excessive height; adoption of an unsymmetrical diffuser; split-face arrangement of an axial-grid type vortex damper; adoption of moisture removal measures to minimize wetness-caused losses; improvement in condenser throat structure and reinforcement system. **Key words:** steam turbine, exhaust hood, aerodynamics, numerical analysis, model experiment

某型气冷涡轮级的三维优化设计 = **Three-dimensional Optimized Design of an Air-cooled Turbine Stage** [刊, 汉] / ZHAO Hong-lei, WANG Song-tao, HAN Wan-jin (Propulsion Theory and Technology Research Institution under Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LI Dong-ping (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21 (5). — 450 ~ 455

With the continuous improvement in performance of modern aeroengines, the design of air-cooled turbines has become ever more important. Many people have conducted a study of optimized design of modern aeroengines without the use of cooling air. However, with respect to the optimized design with cooling air, to date, no literature has yet been available. By a combined use of an artificial neural network and a genetic algorithm, a three-dimensional optimized design was conducted of blade profiles and inter-stage matching of an air-cooled turbine stage. By solving a full three-dimensional viscous flow N-S equation, a flow field calculation was performed. The optimization process involves the adoption of a method,