

船用三级气水分离器阻力特性计算

孙海鸥¹, 孙君², 刘学义³, 曹松棣⁴

(1. 哈尔滨工程大学 动力与核能工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 上海第七〇八研究所, 上海 200011; 3. 哈尔滨第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036; 4. 海军驻哈尔滨汽轮机厂有限责任公司军事代表室, 黑龙江 哈尔滨 150046)

摘要:对两级惯性级进行了阻力特性数值计算, 还利用所创建的多层丝网模型进行了网垫级阻力特性数值计算, 完成了三级气水分离器总阻力特性数值计算。根据要求优选了一种气水分离器结构方案并进行了样机制造, 其阻力特性的实测结果表明, 数值计算的精度满足工程设计要求, 为新型气水分离器研制时的阻力特性预估提供了一种简便、快捷、高精度的分析手段。

关键词:气水分离器; 阻力特性; 数值计算

中图分类号: O241 文献标识码: A

1 引言

为满足燃气轮机、柴油机动力对燃烧和冷却空气的品质要求, 以保障船用动力系统的可靠工作, 气水分离器在装船技术中受到重视。随着船舶总体性能的不断改进提高, 对各装船器件的要求也越来越严格。其中在某些船型上对气水分离器提出了较为严格的高效、低阻和轻型化要求。作者针对某型船的具体要求, 进行了燃气轮机进气系统三级(惯性级—网垫级—惯性级)气水分离器设计研制。以往对于气水分器器的阻力特性主要通过实验方式确定, 虽然惯性级的阻力特性可由数值计算进行预估, 但由于网垫级结构的特殊性, 气水分离器总阻力特性的性能预估很难由数值计算来完成。而根据经验所进行的阻力性能预估往往偏离实测结果过大, 方案改进至合理需要较长周期和做较多实验。本文利用多层丝网模型进行了网垫级阻力特性数值计算, 结合对惯性级阻力性能数值计算的方案改进, 获得了与实测结果吻合很好的气水分离器总阻力特性, 为新型气水分离器研制时的阻力特性预估提供了一种简便、快捷、高精度的分析手段。

2 数值方法

利用 Boussinesq 涡旋粘性假设, 忽略质量力的

可压缩粘性气体的 Navier—Stokes 方程组描述:

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程

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

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho(e + \frac{u_i u_i}{2})] + \frac{\partial}{\partial x_j}\{u_j[\rho(e + \frac{u_i u_i}{2}) + P]\} = \frac{\partial}{\partial x_i}(\kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j \tau_{ij}) \quad (3)$$

状态方程

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (4)$$

式中:

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_T)(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \frac{2}{3} \delta_{ij}(\mu + \mu_T) \frac{\partial u_k}{\partial x_k}$$

τ_{ij} —粘性应力张量; ρ —密度; u_i —速度分量; p —压力; e —单位质量的内能; κ —热传导系数; T —温度; μ —动力粘性系数; μ_T —涡旋粘性系数。

以 k - ϵ 湍流模型计算涡旋粘性系数, 则有关于湍动能 k 及其耗散率 ϵ 的表达式:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}] + C_{\epsilon k} \frac{\epsilon}{k} \times (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

忽略重力影响时, 决定于浮力的湍流生成 G_b 为零, 式(5)和式(6)成为

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + G_k - \rho \epsilon - Y_M \quad (7)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}] + C_{\epsilon k} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

(8) 式中决定于平均速度梯度的湍动能生成为

$$G_k = \mu_T S^2$$

这里 $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ 为平均应变率张量的模, 平均应变率张量由下式给出

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

由 Sarkar 建议的计算可压缩湍流脉动膨胀对总体耗散率的贡献的表达式为

$$Y_M = \rho \epsilon 2 M_t^2$$

其中的湍流马赫数定义为

$$M_t = \sqrt{k/\alpha^2}$$

涡旋粘性系数的表达式为

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (9)$$

由 B. E. Launder 和 D. B. Spalding 给出的关于常数 C_k 、 C_ϵ 、 C_μ 以及 k 和 ϵ 的湍流普朗特数 σ_k 和 σ_ϵ 的值分别为

$$C_k = 1.44, C_\epsilon = 1.92, C_\mu = 0.09,$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

3 惯性级计算方案

以往进行惯性级阻力特性数值计算所界定的计算域为相邻叶片及其进出气边围成的区域, 如图 1 所示。由于叶片厚度约为叶片间距的 10%, 这种以单一通道模化多通道的计算方案存在一定缺陷。对于惯性级尺度较小的轻型化结构, 叶片厚度相对于叶片间距更大, 这里采用周期边界来反映惯性级“级”的概念, 如图 2 所示。

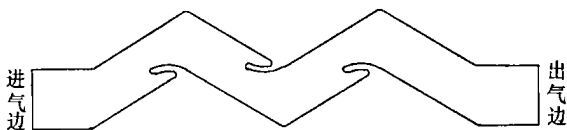


图 1 惯性级单通道计算域

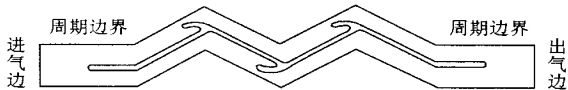


图 2 惯性级“级”计算域

4 网垫级计算方案

船用气水分离器网垫级由几十层以上的丝网叠

加而成, 丝网网孔尺度为毫米量级, 丝网网丝直径 d 为忽米量级, 网孔尺度一般为网丝直径的几十倍。两者尺度如此悬殊给数值计算的网格划分带来了困难, 因为要想使网格疏密能够反映网丝的尺度, 总体网格数就会大得惊人, 这成为网垫级数值计算的主要难点。为使网垫级数值计算成为可能, 需要对网垫级的结构作计算模型上的相应简化。图 3 和图 4 反映了本文作者所提出的简化方法。图 3 为一般编制型式的单层丝网示意图, 其纵横两个方向的平均网格间距分别为 L_1 和 L_2 , 由这两个平均值可以将丝网标准化成相同网丝直径下的网丝正交排列型式。再将丝网网丝由交叉排列简化为单方向排列即实现了三维向二维的简化, 周期边界的应用使计算量得以有效控制, 如图 4 所示。简化后的丝网网丝间距由下式决定:

$$L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2 - d} \quad (10)$$

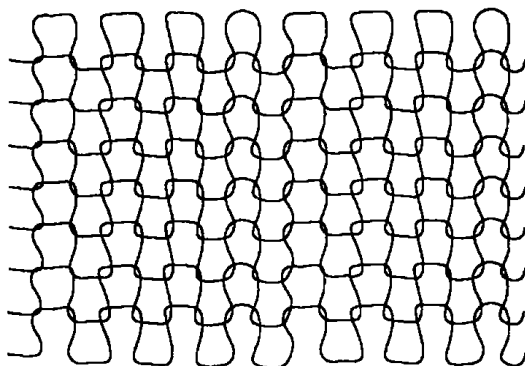


图 3 一般型式的丝网

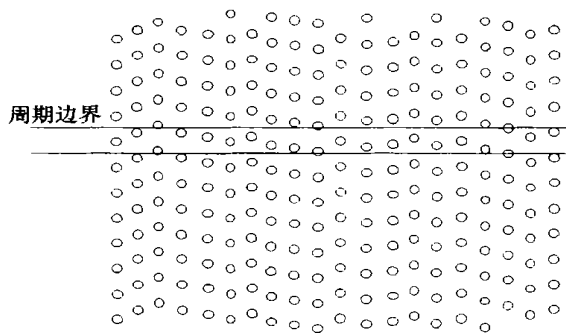


图 4 二维多层丝网

5 计算结果及分析

为了真实反映惯性级边界形状, 计算域采用非结构化网格。在网垫级的网格划分中, 还利用了非

均匀网格划分方案,一方面保证数值计算精度,另一方面控制计算量。图5~图7为惯性级和网垫级计算域网格划分图。

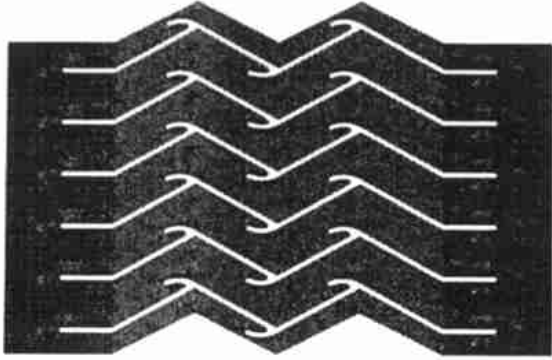


图5 首级惯性级计算域网格



图6 首级惯性级计算域网格(局部)

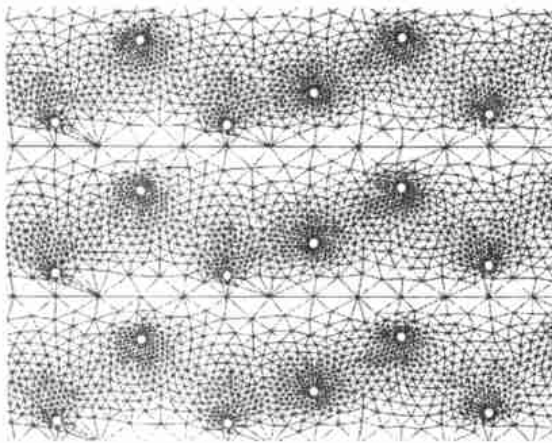


图7 网垫级计算域网格(局部)

图8为首级惯性级速度分布,从图中看出,流道的弯曲以及疏水槽的存在造成了速度分布的极不均匀性。流场内的最高速度存在于疏水槽的顶部区域,计算结果显示,其值可达到进口速度的2.5倍左右。在叶片的转弯处为低速区,而在疏水槽的后部为低速回流区,并且回流区的尺度沿流程是逐渐增

加的。另外计算结果还表明,虽然对应低速和高速时的进口速度差别很大,但回流区的大小基本上相同,可见回流区的产生和回流区的大小基本上决定于惯性级的自身结构,受进口速度大小的影响不明显。

图9为首级惯性级静压分布,伴随着静压总体降低的趋势,在疏水槽处存在与速度分布相对应的大压力梯度,并且在疏水槽后部对应回流区存在逆压梯度,在叶片转弯内角处是明显的局部高压区。将惯性级静压分布与速度分布结合起来看,疏水槽虽然尺度不很大,但它对流场的影响却非常明显。

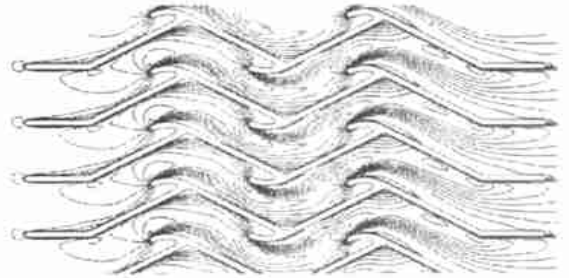


图8 首级惯性级速度分布

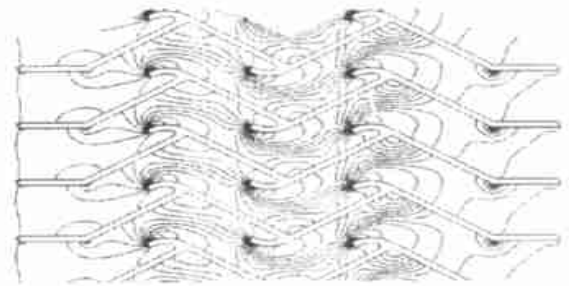


图9 首级惯性级静压分布



图10 首级惯性级总压分布

图10为首级惯性级总压分布,总的说来流动损失造成总压沿流向减小,其减小程度从中心区域向壁面加剧。在疏水槽后回流区附近总压损失明显增大,即总压剧烈下降,由于掺混作用,其下游总压有所上升。

末级惯性级流场分布与首级类似。

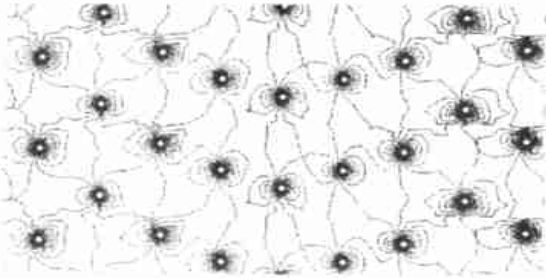


图 11 网垫级速度分布(局部)

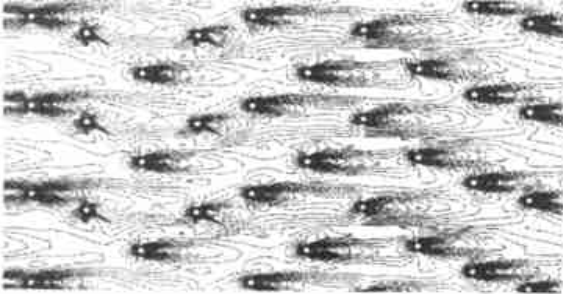


图 12 网垫级静压分布(局部)

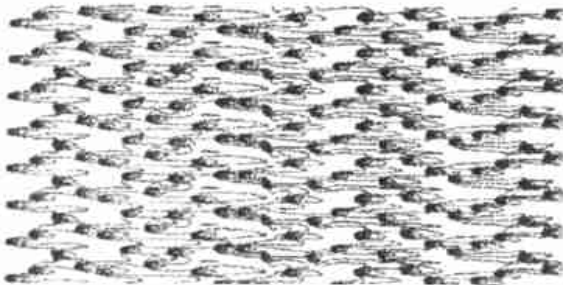


图 13 网垫级总压分布(局部)

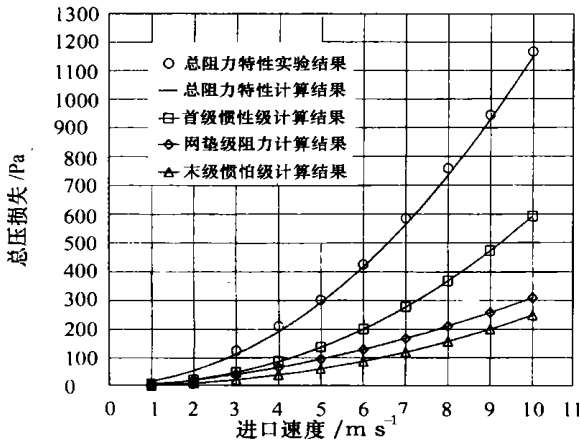


图 14 气水分离器总阻力特性

布。网垫级计算域的确定是将数十层二维丝网依次等距排列构成网垫级，丝网间的网丝错位是随机的，每层丝网的网丝间距都为相同的常数，利用间距大小等于网丝间距的两条平行线(参见图 4)作为周期性边界，便可将计算域的通流限定为网丝间距尺度，从而为兼顾计算域网格尺度能很好地反映网丝尺度同时计算域网格数目又不至于庞大而使计算无法进行奠定基础。可见，周期性边界条件的建立对网格生成提出了特定的要求。对比计算表明，随机性设置可以保障网垫级阻力特性计算的高精度。而采用类似于横管绕流中的顺排方案，则阻力计算值误差很大，即使采用叉排型式，也需要对计算结果进行经验修正，并且很难给出适应范围广的经验修正方案。

图 14 给出了气水分离器总阻力特性的性能预估计算值与样机实验值，总阻力特性计算值由首级惯性级、网垫级和末级惯性级阻力特性计算值叠加而成。样机实验是在专门的实验风洞上进行的。对比表明，总压损失计算值与实验值在 3 ~ 10 m/s 进口速度范围内绝对误差最大不超过 23 Pa，在常规工作速度 6 ~ 10 m/s 范围内相对误差小于 3.6%。

6 结论

在本文提出的惯性级—网垫级—惯性级三级气水分离器阻力特性数值计算方案中，网垫级的丝网降维处理方案使其同惯性级一样，简化成二维问题。虽然两者简化的基础完全不同，但数值计算的处理方法类似，这也是总阻力特性得以成功计算的关键。

阻力特性数值计算具有的高精度可使今后的气水分离器实验工作主要放在分离效率的研究上，这不仅可以缩短气水分分离器的研制周期，而且能够提高气水分分离器的性能优化设计水平。

参考文献:

- [1] 朱自强. 应用计算流体力学[M]. 北京, 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [2] 恽起麟. 风洞实验[M]. 北京, 国防工业出版社, 2000.
- [3] 程元龙. 舰用燃气轮机进气滤清器惯性级内的流场计算和实验验证[J]. 力学学报 1987, 19(4): 293—304.

(渠 源 编 辑)

图 11 ~ 图 13 分别为网垫级速度、静压和总压分

laden Gas Turbine and the Prediction of the Change in Blade Vibration Frequency [刊, 汉] / LU Jia-hua, LING Zhi-guang (Air Transport Institute under the Shanghai University of Engineering Technology, Shanghai, China, Post Code: 200336) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 379 ~ 382

The movement loci of two different density distribution-diameter particles after a gas-solid dual-direction coupling of low particle concentration were solved based on Euler-Lagrange solution basic idea and the simulation calculation of the three-dimensional viscous turbulent flow field of a dual-stage transonic gas turbine. This has been accomplished through the use of a particle random trajectory model and PSIC method. On this basis the erosion rate of the blades was calculated. Its distribution law relatively approximates to the erosion condition of full-scale blades. Then, by utilizing the interrelationship of the established blade erosion rate and vibration frequency the time-dependent variation of blade vibration frequency with erosion was forecast. As a result, a fruitful attempt has been made to identify the influence of blade erosion on blade vibration frequency. **Key words:** particle-laden gas turbine, gas-solid dual-direction coupling, numerical simulation of blade erosion, blade vibration frequency

船用三级气水分离器阻力特性计算 = Calculation of the Resistance Characteristics of a Three-stage Moisture Separator for Marine Applications [刊, 汉] / SUN Hai-ou (Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), SUN Jun (Shanghai No. 708 Research Institute, Shanghai, China, Post Code: 200011), LIU Xue-yi (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 383 ~ 386

The numerical calculation of resistance characteristics was performed for a two-stage inertial stage followed by the numerical calculation of a mesh-pad stage resistance characteristics by the use of a newly built multi-layer gauze model. As a result, the numerical calculation has been completed for the total resistance characteristics of a three-stage moisture separator. On the basis of relevant requirements an optimum construction version of the moisture separator was selected and a sample unit manufactured. The measured resistance characteristics of this unit indicate that the numerical calculation accuracy has met the engineering design requirements. All the above has made it possible to provide a simple, rapid and high-precision analytical means for the prediction of resistance characteristics during the development of a new type of moisture separators. **Key words:** moisture separator, resistance characteristics, numerical calculation

大容量蒸汽机械雾化喷油器控制系统设计研究 = Design Study of the Control System of Mechanical-atomization Oil Sprayers for a High-capacity Steam Turbine [刊, 汉] / LI Lai-chun, WEI Shao-jie (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), DENG Cai-xia (Automation Research Institute under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 387 ~ 390

To date, a control system of mechanical-atomization oil sprayers has never found application in China for large-capacity marine steam turbines. On the basis of drawing on relevant overseas technology coupled with the present development level of automation instrumentation the authors have conducted a design study of the above-mentioned control system. A brief account is given of the composition, working principles and the control mode of various automatic regulating loops of an all-electric control system. Also presented are the relationship curves of relevant parameters. **Key words:** supercharged boiler, large-capacity oil sprayer, control system

船用主汽轮机组测速泵改进的试验研究 = Experimental Investigation on the Improvement of a Speed Measuring Pump for a Marine Steam Turbine Unit [刊, 汉] / LIU Quan-en, LIU Jiang, SONG Cheng-lin, QIU Zu-fa (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(4): 391 ~ 392, 398

The theoretical calculation of oil leakage of a speed-measuring pump with either plate-type or floating-type seal construction has been performed and the oil leakage as influenced by the seal gap change in these two types of seal construction compared and identified. On this basis the authors have come up with an improved version. A test was conducted of the