文章编号: 1001－2060(2001)05－0507－04

先进汽轮机准三维设计方法研究与流型分析

张冬阳[1], 蒋洪德[1], 李久华[2]

(1. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京　100080; 2. 江西电力试验研究院, 江西 南昌　330006)

摘　要: 说明了所发展的先进汽轮机准三维设计方法, 并以改造成功的 200 MW 机组为对象, 进行了流型分析。

关　键　词: 汽轮机; 准三维设计; 流型分析

中图分类号: TK262　　文献标识码: A

1　前言

电力在国民经济的运行和发展中具有十分重要的作用。由于我国的天然可用能源以煤为主和核能的清洁性, 决定了目前和将来我国的发电手段仍是以火力发电为主, 核能逐步发展的状况。而汽轮机是火力和核能发电装置的核心部件, 它的经济性如何直接影响发电装置的性能和能源的利用率。

目前, 在先进的汽轮机通流部分气动热力设计中, 由于准三维计算技术的成熟及全三维计算技术的发展, 已经形成了以准三维设计为核心的, 基于一维、准三维和全三维耦合计算的气动热力设计方法。本文作者参加了该类方法的发展工作并将其应用到多种型号的汽轮机改造设计上, 已运行的机组热力实验结果表明, 设计均取得了成功。下文将介绍所开发的与准三维气动热力设计系统相关的设计方法。

在对 200 MW 机组成功改造的基础上, 本文作者分析了该机组高低压缸三种不同流型及其组合情况。所得结果可作为设计参考。

2　准三维计算方法进展

2.1　S_2 流面计算方法的进展

准三维计算包括两部分: S_2 流面计算和 S_1 回转面计算, 两者采用耦合方式传递数据。本文的 S_2 流面计算方法是采用流函数矩阵解法和非正交计算网格及速度分量, 该方法快速准确。为了满足大规模设计计算工作的需要, 本文作者对 S_2 流面计算程序进行了改进, 使之在计算适应性和工程化方面, 更加完善。该程序能适应多种方式控制背压、湿汽及抽汽影响、弯曲叶片的采用等多种情况, 且数据传输自动化。该程序在高中压缸的计算时对流场初值设定等因素不敏感, 且收敛性极佳。在低压缸中, 工质流动是跨音速的, 本文中采用的是流函数求解方法。由于流函数基本方程的数学物理本质限制, 若子午面上的分速为超音时则计算会失效。而低压缸末级和次末级的子午面马赫数均较高 (可达到 0.7～0.8 以上), 以及马赫数在跨音速区对环量的敏感性, 使得在进行 S_2 流面计算时对环量均值及沿叶高的分布有较高的要求, 如果环量初值给得不当, 则易导致计算失败。为此采取的解决办法之一是逐步建立一个环量数据库, 针对不同的叶片叶型和出口马赫数, 采用相应的环量数据, 使计算最大限度地减少初始环量与最终环量之间的误差。这样就减少了环量初值设置的盲目性和环量调整的次数, 因此也大幅度地减少了设计周期。另一种方法是采用正反问题交替计算的方法, 以正问题计算得到相近的值, 再逐叶片排不断地修正环量, 最终以反问题求得要求的收敛解。

2.2　全三维计算与弯叶片对准三维 S_2 流面计算结果的影响

随着三维计算技术的发展, 全三维计算在汽轮机气动热力设计系统中的作用在逐步加强, 准三维计算与全三维计算的耦合关系亦应加强。经过实验校准的全三维计算给出准确的损失系数沿叶高的分布以提供给准三维计算, 使准三维计算的准确性提高。在两者关联准则上, 使准三维和全三维计算给出的通流面积和级内效率保证基本一致。从多次的计算结果来看, 在定性上, 准三维计算与全三维计算结果是一致的, 在定量上, 两者也是相当接近的。

目前先进的弯扭联合成型的叶片在汽轮机中得到了广泛应用, 为保证计算结果的合理性, 作者在准三维计算中根据实验和计算结果考虑了如下两点: 采用弯叶片时流动损失系数的降低和气流落后角的

收稿日期: 2000－08－28; 修订日期: 2000－10－16

作者简介: 张冬阳(1964－), 男, 吉林四平人, 工程热物理研究所副研究员.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

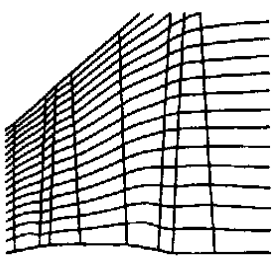

图 1 低压缸末级和次末级流线

改变。流动损失系数的减低使速度系数提高，不仅体现在弯曲静叶栅中，而且也体现在其下游的动叶栅中。气流落后角沿叶高的分布则依叶片弯曲型式的不同而不同，弯曲角较大时一般落后角较大。作者在综合大量实验数据和三维数值计算结果的基础上，建立了适用于准三维计算的气流落后角与弯曲形式和气流参数之间的关系，即弯扭叶片落后角模型，并应用于具体设计中。图 1 所示为低压缸次末级和末级静叶采用 J 型弯曲（叶片根部弯曲）之后的流线图。

2.3 与一维的交互计算

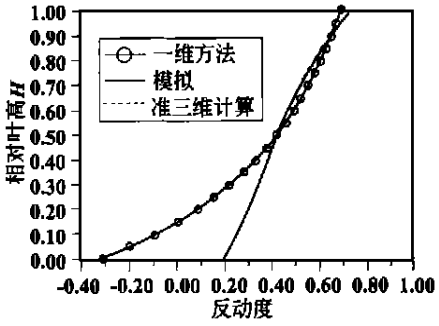

图 2 S_2 流面及一维计算的反动度

准三维与一维计算是耦合的关系。取该关系的准则是在通流面积和效率上准三维和一维计算的基本一致。对于子午面外壁扩张角很大的情况，本文作者采用了叶片排汽面积相同的原则，使一维计算的叶片喉部面积与准三维计算的出汽边面积相同。这样计算既考虑扩张角，同时也保证计算合理。另外，一维热力计算不仅仅需要中部截面数据或平均值，也需要叶根和叶顶的数据，如反动度值，以计算轴向推力和漏汽量等参数。为此，本文作者依据多个准三维计算结果，针对各种叶片型式和径高比（D/L）值，拟合了沿叶高各截面（包括叶根和叶顶）的反动度与叶中反动度的比值关于相对叶高的函数。对于弯曲静叶片和非弯动叶的组合，反动度取相对叶高的四次代数式。图 2 所示为一低压缸中某级（采用弯曲静叶栅）的准三维计算的反动度，拟合结果与一维方法计算的数值对比。

3 200 MW 汽轮机流型分析

本文作者将上述方法应用于汽轮机的改造设计，基于改造成功的 200 MW 汽轮机的准三维设计数据，从流型的角度，以特征几何和气动参数分析当代冲动式汽轮机的部分设计特点。

在本文中，流型的概念是广义地指叶片扭曲规律和热力气动参数沿叶高的分布规律。在冲动式汽轮机中，将流型分为三种：自由涡流型、可控涡流型、先进涡流型。所谓先进涡流型是指先进叶片三维成型及流动参数沿叶高分布规律。本文作者选取如下特征参数来分析流型：

（1）几何参数：取叶片型式、叶片几何出气角沿叶高分布规律、子午通道内外壁面造型特征及叶片中径与高度比（D/H）等，用这些参数说明叶片造型规律。

（2）气动参数：将密流、压力、马赫数、动叶绝对出气角及速比等做为特征参数，以期全面反映流型的性质。

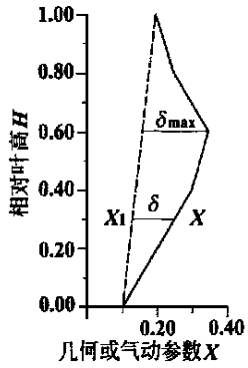

图 3 δ_{max} 示意图

下面以 200 MW 高压缸压力级部分的某一设计方案的若干结果，简述其流型特点。

该设计方案中高压缸有 11 级。静叶前三级由等截面直叶片组成，后八级由弯扭联合成型叶栅组成。前八级动叶片为等截面直叶片，后三级为变截面扭叶片。子午流道边界为内外壁平直通道。在下面的几何与气动参数分析中，计算 $\Delta X/H$ 与 δ_{max}/X。X 代表所要分析的任一参数沿叶高分布的集合，ΔX 为该参数 X 在顶部和根部的差值。H 代表相对叶片高度。X 为 X 的平均值。而 $\delta = X - X_1$，X_1 与 X 在同一叶高位置，但在 X 的根顶点所连直线上。δ_{max} 为绝对值最大的 δ，见图 3。

前三级直静叶片和前八级直动叶片出气角沿叶高分布的线性度非常好（δ_{max}/β 非常小），可见，直叶片的出气角完全可以按沿叶高线性分布处理。后八级静叶在弯的基础上又作了扭转，以减小动叶攻角。考虑弯叶片引起的沿叶高 C 型气流落后角分布，即在中部引起最大的负落后角，而在根顶引起正落后角，为此在直叶片的基础上又进行了反 C 型的扭转造型，因而形成了该八级静叶的 δ_{max}/β 均在中部且较大的造型。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　静叶几何出气角特性

级	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\frac{\Delta\beta}{H}$	32.92	33.01	32.97	10.42	13.29	14.76	15.86	16.67	25.91	24.24	22.65
$\frac{\delta_{max}}{\beta}$	−0.001	−0.001	−0.001	0.126	0.129	0.135	0.132	0.129	0.109	0.106	0.105
δ_{max} 所在的相对叶高位置	0.80	0.20	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

表 2　动叶几何出气角特性

级	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\frac{\Delta\beta}{H}$	31.96	32.11	32.31	29.92	30.22	30.54	30.86	31.25	−29.84	−31.02	−30.62
$\frac{\delta_{max}}{\beta}$	−0.003	−0.003	−0.003	−0.003	−0.004	−0.004	−0.005	−0.006	0.031	0.034	0.033
δ_{max} 所在的相对叶高位置	0.40	0.50	0.40	0.50	0.50	0.50	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40

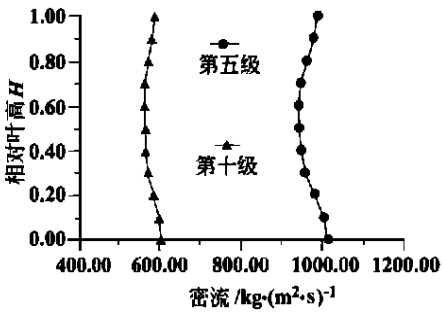

图 4　第 5、10 级静叶出口密流分布图

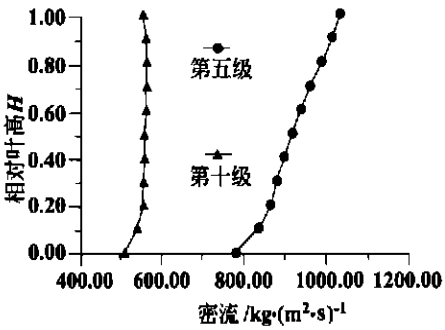

图 5　第 5、10 级动叶出口密流分布图

高压缸 4 ~ 8 级径高比 (D/L) 较大 (见表 3), 采用了先进涡流型和一维联合造型设计。虽然先进涡流型造型是针对静叶的, 但对动叶内的流场参数也有影响。静叶的弯扭联合造型使得静叶后的出口气流角度接近于直叶片。9 ~ 11 级为先进涡流型和近自由涡流型联合造型设计, 虽然不是严格意义上的自由涡流型, 但它却保留了两者的特点。弯扭联合造型的静叶既提高了效率, 又使动叶进口的攻角在动叶叶型不变的条件下保持较小的数值, 使静叶出口的流场较均匀, 这对动叶的流场优化有益。因此, 高压缸的叶片造型应具有较高的效率。

表 3　中径高度比

级	1	3	8	11
D/L	16.9	14.9	10.2	8.2

本文中采用的静叶根顶双正弯弯曲型式引起的根部落后角比顶部落后角大, 虽然几何出气角是正扭的, 但仍造成了根部密流的增大, 见图 4。密流的 δ_{max} 均在各静叶中部(50% 叶高), 且为负值, 形成直线加 C 型的密流分布, 这显然与弯曲引起的中部负落后角有关。因此, 先进涡造型完全改变了静叶的密流分布。图 4 为动叶密流分布。对比前八级动叶, 后三级动叶的密流 $\Delta X/h$ 明显减少, 说明了顶部流量的减少, 这应与该三级动叶反扭有关。

4　结论

(1) 本文作者发展了汽轮机热力设计体系内准三维 S_2 流面计算模块, 使之满足先进汽轮机设计。发展了跨音速级计算收敛方法, 建立了应用弯扭叶栅的气流落后角模型, 并采用全三维计算结果修正准三维的计算结果。

(2) 对改造设计的 200 MW 汽轮机高压缸进行了流型分析。当级的径高比大于 10 时, 主要为一维造型加先进涡流型; 在径高比小于 10 时, 为先进涡流型加自由涡流型。

(3) 在 S_2 流面与一维的交互计算中, S_2 流面计算考虑了低压缸外壁大扩张角的影响。拟合了具有长弯静叶级的反动度沿叶高分布的解析式, 使一维计算中相关参数的计算精度提高。

(下转第 512 页)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2中的K_1表示每列中凡是对应水平1的气体带水量相加，如A列$K_1 = Y_1 + Y_2 + Y_3 = 619.6$。$K_2$，$K_3$的意义相同。为了直观，画出因素与气体带水量之间的关系图(图3)。

图3表明：叶片数目$n = 15$、外圆直径$d = 450$ mm、叶片高度$h = 80$ mm和叶片切向角$\alpha = 20$度时，气体带水量均最小。气体带水量越小越好，所以脱水性能最佳的除水器结构参数为：叶片数目$n = 15$，外圆直径$d = 450$ mm，叶片高度$h = 80$ mm，叶片切向角$\alpha = 20$度。

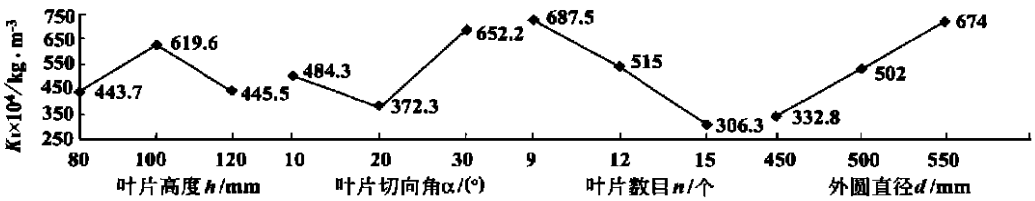

图3 因素与气体带水量之间的关系图

3 结论

用于湿式烟气脱硫装置的除水器脱水性能的高低直接影响着其后风机和烟道的寿命以及风机的安全运行，而除水器的结构参数——叶片数目(n)、外圆直径(d)、叶片高度(h)、叶片切向角(α)等因素影响除水器的脱水性能。为了确定其的最佳结构参数，将正交实验法用于除水器的优化设计。以9次按正交设计的实验代替81次全面实验，为实验而加工制作的除水器也由81个减少到9个，大大减小了实验的工作量，降低了实验投资，并且，其实验效果与全面实验的效果相同。

通过方差分析，确定了各因素影响除水器脱水性能的显著水平，叶片数目(n)、外圆直径(d)、叶片高度(h)、叶片切向角(α)对脱水性能都有显著影响，影响程度从大到小的排列顺序为：叶片数目(n)、外圆直径(d)、叶片切向角(α)、叶片高度(h)。

对应某一空气量，除水器脱水性能最佳的结构参数为：叶片数目$n = 15$，外圆直径$d = 450$ mm，叶片高度$h = 80$ mm，叶片切向角$\alpha = 20$度。

参考文献：

[1] 仇中柱. 燃煤工业锅炉旋流烟气脱硫装置的研究[D]. 上海：同济大学，1999.

[2] 史猛. 对烟气湿式脱硫除尘后的烟气带水问题的研究[D]. 上海：同济大学，1998.

[3] 北京大学数学力学系数学专业概率统计组编. 正交设计[M]. 北京：人民教育出版社，1976.

[4] 中国科学院数学研究所数理统计组编. 正交实验法[M]. 北京：人民教育出版社，1975.

[5] 中国科学院数学研究所统计组编. 常用数理统计方法[M]. 北京：科学出版社，1974.

[6] 中国科学院数学研究所统计组编. 方差分析[M]. 北京：科学出版社，1977.

[7] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安：西安交通大学出版社，1987.

(何静芳 编辑)

(上接第509页)

参考文献：

[1] ANDREAS P Weiss. Advanced LP steam turbine design[R]. Switzerland: ABB, 1998.

[2] HALLER B R, Hesketh J A. Large steam turbine retrofitting to improve performance[R]. Italy: GEC Alsthon, 1993.

[3] 谭春青. 透平叶栅中叶片的弯曲对流场性能影响的实验研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，1993.

[4] 刘凤君，王仲奇. 适用于具有弯曲叶片的叶轮机械设计的正问题计算方法[J]. 工程热物理学报，1990，**11**(2)：169—171.

[5] 舒士甄. 叶轮机械原理[M]. 北京：清华大学出版社，1991.

(何静芳 编辑)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

503 ~ 506

On the basis of the first and second laws of thermodynamics and under constant heat flux conditions an analysis was conducted of the influence of fouling on the thermodynamic performance of convection heat exchange process in a tube. A criterion for evaluating such an influence is put forward, the so-called relative increment number of dimensionless entropy generation. Also discussed is the effect of parameters such as in-tube fluid Reynolds number (in the absence of fouling) and dimensionless heat flux density on the above-mentioned increment number. The results of the study indicate that the above criterion reflects not only the effect of fouling on the in-tube heat transfer process but also the effect of fouling on the in-tube flow process. It is noted that the entropy generation caused by the fouling layer heat conduction plays an important role in the total entropy generation of the in-tube heat transfer process. In addition, the study results have been compared with those of a tube with constant wall temperature. **Key words**: constant heat flux, convection heat exchange, fouling, thermodynamic performance

先进汽轮机准三维设计方法研究与流型分析＝**A Study of the Quasi Three-dimensional Design Method for an Advanced Steam Turbine and an Analysis of Its Flow Patterns** [刊, 汉] / ZHANG Dong-yang, JIANG Hong-de (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), LI Jiu-hua (Jiangxi Electric Power Testing Research Institute, Nanchong, Jiangxi Province, China, Post Code: 330006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). —507 ~ 509, 512

Presented is the development of a quasi three-dimensional design method for an advanced steam turbine. With a successfully modified 200 MW unit serving as an object of study the authors have performed the related analysis of its flow patterns. **Key words**: steam turbine, quasi three-dimensional design, flow pattern analysis

正交实验法在湿式烟气脱硫装置除水器实验中的应用＝**The Application of an Orthogonal Experimental Method in the Experimental Study of a Dehydrator for a Wet Flue Gas Desulfurization Unit** [刊, 汉] / QIU Zhong-zhu, ZHANG He-sheng, XU Ji-huan (Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 200092) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). —510 ~ 512

An orthogonal experimental method was employed to conduct the experimental study of the performance of a centrifugal dehydrator for a wet flue gas desulfurization unit. Through a variance analysis of the test data the effect of the various structural parameters of the dehydrator on water removal performance was ascertained along with an determination of the optimum structural parameters of the dehydrator. This had led to an optimum design of the latter. **Key words**: orthogonal experimental method, centrifugal dehydrator, dehydration performance, optimum design

大型油页岩循环床电站锅炉运行性能分析＝**Operating Performance Analysis of an Oil Shale-fired Circulating Fluidized Bed Boiler of the Highest Capacity Currently in Operation in China** [刊, 汉] / WANG Qing, HAO Zhi-jing, SUN Jian, et al (Power Engineering Department, Northeast Electric Power Institute, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). —513 ~ 516

Presented are the design features, overall structure, operating performance and the test results of a 65 t/h oil shale-fired circulating fluidized bed boiler of low circulation ratio. The economic and social benefits of the power plant operating on oil shale were also analyzed. The test results show that the overall performance of the boiler has attained the advanced international level. **Key words**: oil shale, circulating fluidized bed, boiler, operation

汽轮机真空系统严密性试验的静态模拟计算＝**Static Simulation Calculation of the Air Tightness Test of a Steam Turbine Vacuum System** [刊, 汉] / LI Yong, DONG Yu-liang, YANG Shan-rang (Power Engineering Department, Northeast Electric Power Institute, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). —517 ~ 519

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net