

DOI: 10.7652/xjtuxb201401005

汽轮机中湿汽损失的定量计算

李瑜¹, 宁德亮², 李亮¹, 李军¹

(1. 西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安; 2. 中国船舶重工集团公司第 703 研究所, 150078, 哈尔滨)

摘要: 为了提高湿汽损失的计算精度,在湿蒸汽非平衡凝结流动计算结果的基础上,采用 Fortran 语言发展了湿汽损失的定量计算程序,即利用多级透平内湿蒸汽非平衡凝结流动的三维计算方法获得各透平级的气动参数和一次水滴的三维分布,再对三维计算结果进行周向平均,从而获得了圆柱坐标系下子午面内的流场参数,并以此为基础进行湿汽损失的定量计算。对某核电汽轮机低压缸中的湿汽损失进行了分析,结果表明:湿汽损失中热力学损失主要产生于发生非平衡凝结的中间级和末级;水滴阻力损失在末级中较大,其余各级中较小;制动损失沿着流动方向逐级增加,是湿汽损失最主要的组成部分;疏水损失及离心损失在湿汽损失中所占比例较小;总的湿汽损失占该核电汽轮机低压缸总功率的 3.1%。与 Baumann 公式 3.9% 的计算结果相比,该定量计算得到的湿汽损失更小,定量计算方法可为核电汽轮机的设计和优化提供参考。

关键词: 汽轮机;湿汽损失;定量计算;Baumann 公式

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)01-0025-06

Quantitative Evaluation of Wetness Losses in Steam Turbine

LI Yu¹, NING Deliang², LI Liang¹, LI Jun¹

(1. Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. No. 703 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Harbin 150078, China)

Abstract: In order to improve the evaluation accuracy of wetness losses, a quantitative evaluation program of wetness losses was developed using the Fortran language from the calculation results of wet steam flow with non-equilibrium condensation. A three-dimensional (3D) simulation of the wet steam flow with non-equilibrium condensation in a multi-stage turbine was performed to obtain the aerodynamic parameters and 3D distribution of the fine droplets. Then the 3D results were circumferentially averaged to obtain the flow field in the meridian plane, and the parameters of the flow field were used to quantitatively evaluate the wetness losses. The wetness losses in the low pressure (LP) cylinder of a nuclear steam turbine were calculated. The results show that the thermodynamic loss is mainly generated in the intermediate and last stages where the non-equilibrium condensation occurs. The droplet drag loss has a greater proportion in the last stage, and lower proportion in other stages. The brake loss is the most important component of the wetness losses, and it increases stage by stage. The collected water loss and the centrifugal loss have small proportions in the total losses. The total wetness losses in the LP cylinder under consideration account for 3.1% of the total output power of the LP cylinder, less than 3.9% predicted by the Baumann rule.

Keywords: steam turbine; wetness losses; quantitative evaluation; Baumann rule

收稿日期: 2013-03-22。 作者简介: 李瑜(1982—),男,博士生;李亮(通信作者),男,副教授。

网络出版时间: 2013-10-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131017.1156.003.html>

湿蒸汽流动一直是汽轮机中的一个重要问题,它会引起效率降低和叶片水蚀破坏^[1]。核电汽轮机高、低压缸中的大部分透平级都工作在湿蒸汽区,末级出口的湿度可达10%~13%。湿蒸汽在汽轮机中流动会产生一次水滴和二次水滴,由于非平衡凝结,水滴和汽相的速度差异以及叶片表面形成的水膜等会使汽轮机的效率显著降低。1912年Baumann指出,1%的平均湿度会使效率下降1%^[2],这是经验性的湿汽损失估算法。另有学者发现,多级透平内各级的湿汽损失与Baumann估算结果不一致^[3-4],这是估算方法仅考虑了湿度的大小,忽略了不同尺寸水滴的数量和分布的缘故。因此,发展一种定量计算透平级内湿汽损失的方法对提高湿蒸汽汽轮机的设计水平具有重要的意义。

湿汽损失按生成机理可以分为热力学损失、水滴阻力损失、制动损失、疏水损失和离心损失^[1,5]。如果通过计算或试验获得了汽轮机内一次水滴和二次水滴的详细分布,就可以对湿汽损失进行定量计算,文献[6-7]进行了这样的尝试。

目前,汽轮机的设计和优化中采用了非平衡凝结流动模型进行数值模拟^[8-9],并且获得了详细的一次水滴分布,由此可以计算出一次水滴引起的湿汽损失,为二次水滴的大小和级内分布的计算提供了数据。

本文以汽轮机内非平衡凝结流动计算的结果为基础,采用Fortran语言发展了定量计算湿汽损失的程序,对湿蒸汽透平中的湿汽损失进行了计算,并与Baumann估算结果进行了对比。

1 凝结流场中水滴的分布和运动轨迹的计算方法

非平衡凝结流动计算方法可以用于一维喷管^[10]、二维叶栅^[11]及多级透平内的湿蒸汽流动的准确计算^[12]。本文利用文献[11-12]中的方法对某1 000 MW核电汽轮机低压缸内的非平衡凝结流动进行了计算,得到了各透平级内的气动参数和一次水滴的三维分布。通过对三维计算结果进行周向平均,获得了圆柱坐标系下子午面内的流场参数,包括速度、静压、过冷度、饱和温度和湍动能,汽相的密度和动力黏性,液相一次水滴的密度、直径、体积分、声速和表面张力,再依据静叶和动叶的叶型数据,可以计算出一次水滴和二次水滴的运动轨迹。

水滴在汽相流场中运动主要受到惯性的作用和湍流扩散的作用。

1.1 惯性的作用

对于惯性的作用,水滴受力的微分方程为

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_d \frac{dV}{dt} = F_D + F_B + F_{VM} + F_P + F_{BA} \quad (1)$$

式中: d 为水滴的直径; ρ_d 为水滴的密度; V 为水滴的速度; F_D 、 F_B 、 F_{VM} 、 F_P 和 F_{BA} 分别为水滴受到的拖曳力、浮升力、虚拟质量力、压力梯度力和巴斯特力。在汽轮机中,由于汽相密度远小于水滴密度、水滴的直径在微米量级以及动叶高速旋转等因素,所以水滴的浮升力、虚拟质量力、压力梯度力和非定常作用的巴斯特力可以忽略,水滴受力的微分方程可简化为

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_d \frac{dV}{dt} = F_D = \frac{C_D}{2} \frac{\pi d^2}{4} \rho_g (U - V) |U - V| \quad (2)$$

式中: C_D 为阻力系数; ρ_g 为汽相的密度; U 为汽相的时均速度。 C_D 是一个与雷诺数有复杂关系的函数,可以按照文献[13]给出的方法计算。雷诺数

$$Re = \frac{\rho_g |U - V| d}{\mu_g} \quad (3)$$

式中: μ_g 为汽相的动力黏性。直角坐标下水滴受力的微分方程转为圆柱坐标的表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\pi d^3}{6} \rho_d \frac{d^2 R}{dt^2} &= F_{DR} + R \left(\frac{d\theta}{dt} + \omega \right)^2 \frac{\pi d^3}{6} \rho_d \\ \frac{\pi d^3}{6} \rho_d R \frac{d^2 \theta}{dt^2} &= F_{D\theta} - 2 \frac{dR}{dt} \left(\frac{d\theta}{dt} + \omega \right) \frac{\pi d^3}{6} \rho_d \\ \frac{\pi d^3}{6} \rho_d \frac{d^2 Z}{dt^2} &= F_{DZ} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: R 、 θ 、 Z 分别为径向、周向和轴向坐标; F_{DR} 、 $F_{D\theta}$ 和 F_{DZ} 分别为水滴在径向、周向和轴向的受力; ω 为动叶的角速度。

1.2 湍流扩散的作用

湍流扩散的作用是脉动速度作用在时均速度上实现的。根据本文选择的SST $k-\omega$ 两方程湍流模型,汽相流场的脉动速度为

$$u' = \zeta \left(\frac{2}{3} k \right)^{1/2}; \quad v' = \zeta \left(\frac{2}{3} k \right)^{1/2}; \quad w' = \zeta \left(\frac{2}{3} k \right)^{1/2} \quad (5)$$

式中: ζ 为服从标准正态分布的随机数; k 为汽相的湍动能。若汽相的脉动速度是各向同性的,则 $u' = v' = w'$,汽相的瞬时速度为时均速度与脉动速度之和,即

$$u = U + u'; \quad v = V + v'; \quad w = W + w' \quad (6)$$

考虑湍流扩散的作用,微分方程(2)中汽相的时均速度为瞬时速度,这样可以计算湍流扩散作用下

的水滴受力。

2 湿汽损失的计算模型

2.1 热力学损失

在湿蒸汽透平的非平衡凝结过程中,蒸汽高速流动会产生过冷现象,非平衡凝结会产生成核现象,这些因素将引起不可逆的传热传质过程,从而导致热力学损失。该项损失主要与蒸汽潜热及过冷度有关,计算式为

$$\Delta P_h = \int_{Z_1}^{Z_2} L \frac{dQ_1}{dZ} \frac{\Delta T}{T_s} dZ \quad (7)$$

式中: Z_1 为透平级轴向起点坐标; Z_2 为透平级轴向终点坐标; L 为潜热; Q_1 为一次水滴的质量流量; ΔT 为过冷度; T_s 为饱和温度。

2.2 水滴阻力损失

凝结流场中,受惯性和湍流扩散的作用,水滴在汽相流场中做加速或减速运动,该运动与汽相速度存在差异,给汽相流动带来阻力,由此引起的损失称为水滴阻力损失,在静叶和动叶区域可采用二重积分进行计算,即

$$\Delta P_f = \int_{R_1}^{R_2} \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{3\pi}{2d} C_{D\rho_g} (U - V)^3 (1 - \alpha_1) R dR dZ \quad (8)$$

式中: R_1 为叶根径向坐标; R_2 为叶顶径向坐标; $(1 - \alpha_1)$ 为一次水滴的体积分数,指单位湿蒸汽体积内一次水滴体积所占的比例。一次水滴的体积分数可以从凝结流场计算结果中得到,或者采用如下公式计算,即

$$(1 - \alpha_1) = \frac{1}{1 + (1/Y - 1)(\rho_d/\rho_g)} \quad (9)$$

式中: Y 为湿度。

2.3 制动损失

静叶尾缘处形成的二次水滴直径较大,在汽流中提速较慢,因此二次水滴的速度三角形和汽相的速度三角形存在明显差异。从速度三角形上看,二次水滴会撞击动叶吸力面前缘,对动叶产生制动,从而形成制动损失,其原理如图1所示。

取微元控制体 dR 为径向微元, l_R 为径向上的轴向制动长度,微元控制体上动叶受到的周向制动力为

$$dF = P_w l_R (1 - \alpha_2) dR \quad (10)$$

式中: P_w 为水锤力; $(1 - \alpha_2)$ 为二次水滴的体积分数。假设沉积在叶片表面的一次水滴在叶片尾缘处完全转化为二次水滴,二次水滴的体积分数就是沉

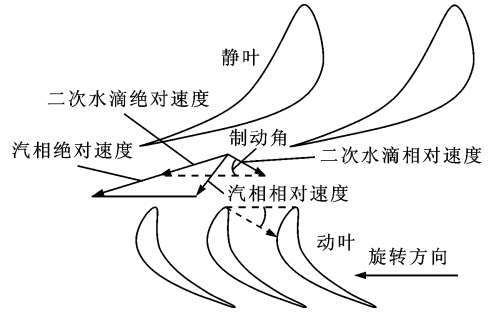


图1 汽相和二次水滴的速度三角形关系

积的一次水滴的体积分数。整个动叶区域的制动损失为

$$\Delta P_s = M\omega \int_{R_1}^{R_2} P_w l_R R (1 - \alpha_2) dR \quad (11)$$

式中: M 为动叶叶片数。

2.4 疏水损失

非平衡凝结产生的水滴在叶片表面沉积会使得汽相做功工质减少,由工质减少而损失的输出功称为疏水损失。单级的疏水损失为

$$\Delta P_m = P_{st} \frac{Q_1}{Q_{wet}} \quad (12)$$

式中: P_{st} 为级输出功; Q_{wet} 为湿蒸汽的总质量流量。

2.5 离心损失

沉积在动叶表面上的水滴会形成水膜,水膜跟随动叶一起旋转,消耗透平输出功,称之为离心损失。微元控制体上损失的功率为

$$\Delta P = dQ_1 (V_{tip}^2 - v^2) \quad (13)$$

式中: dQ_1 为微元控制体上沉积的一次水滴的质量流量,可以根据沉积率计算; V_{tip} 和 v 均为旋转速度。动叶区域的离心损失为

$$\Delta P_c = \int_{R_1}^{R_2} dQ_1 (V_{tip}^2 - v^2) = Q_1 \omega^2 (R_2^2 - R_1^2) \quad (14)$$

3 程序运行流程

本程序采用 Fortran 语言开发,图2为程序的运行流程。根据一次水滴产生的初始位置(首次发生非平衡凝结的位置)和初始速度(和汽相的速度相同),采用四阶龙哥库塔法求解一次水滴受力的微分方程(4),计算一次水滴在不同时刻的速度和位移,得到一次水滴在汽相流场中的速度场和运动轨迹。结合叶型压力面和吸力面的几何数据,统计一次水滴在叶片表面的沉积率。一次水滴在叶片表面沉积后形成水膜或溪流,并在汽流力的作用下向尾缘移动且被汽流撕裂形成二次水滴。假设沉积在叶

片表面的一次水滴在叶片尾缘处完全转化为二次水滴,二次水滴的流量可由一次水滴的流量和沉积率计算。二次水滴的直径可以根据叶片尾缘处的气动参数和物性参数由临界韦伯数计算获得。静叶尾缘处二次水滴的初速度为0,动叶尾缘处二次水滴的初速度为叶片的旋转速度,采用和一次水滴同样的计算方法便可计算获得二次水滴的运动轨迹。

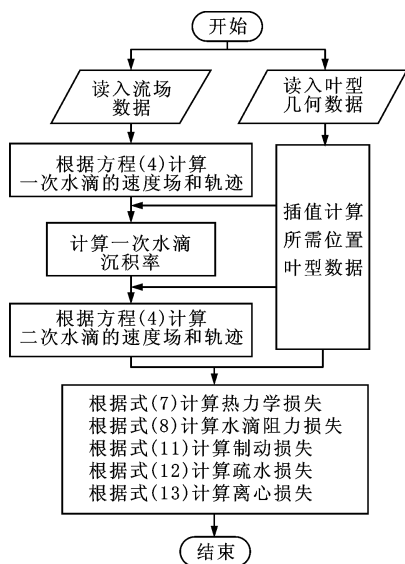


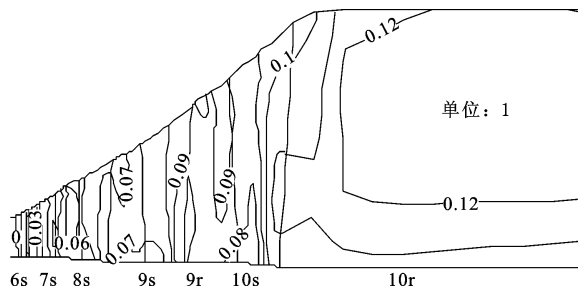
图2 程序运行流程图

根据一次水滴和二次水滴的运动轨迹,以及一次水滴的沉积率等参数,采用第2节中湿汽损失计算模型可以定量计算各项湿汽损失。

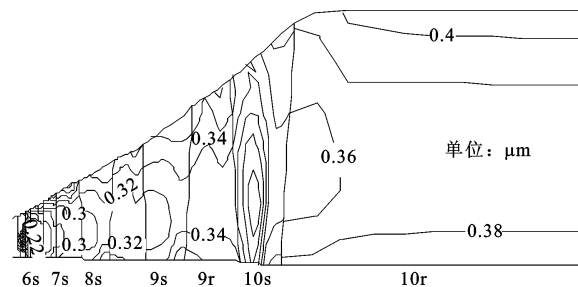
4 计算结果分析

以某1 000 MW核电汽轮机低压缸为对象进行分析,该低压缸内透平级数为10,低压缸进口为过热蒸汽,末级采用空心静叶除湿结构。图3为计算得到的子午面内的一次水滴的湿度和直径的等值线分布。从图3a可以看到,在第6级静叶中,非平衡凝结开始发生,有湿度产生,低压缸出口湿度为0.12。三维计算中根据热力设计结果给定了末级空心静叶的除湿量,因此末级后的湿度是考虑空心静叶除湿后的湿度情况。从图3b可以看到,第6级静叶发生非平衡凝结后,一次水滴的直径大约是 $0.22\text{ }\mu\text{m}$,在下游各级中一次水滴直径增长较快,低压缸出口处一次水滴直径达到了 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。

图4为低压缸内各级的湿汽损失计算结果。从图4可以看到:透平前5级工作在过热蒸汽区,没有湿汽损失产生,透平第6级发生了非平衡凝结,湿汽损失开始产生。



(a) 一次水滴的湿度



(b) 一次水滴的直径

6s:6级静叶;9r:9级动叶;其余符号以此类推

图3 核电汽轮机低压缸子午面液相参数等值线

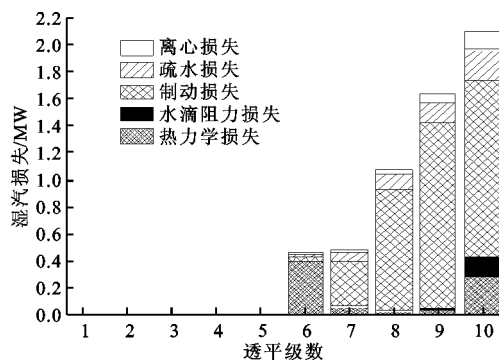


图4 核电汽轮机低压缸各级的湿汽损失

热力学损失和过冷与成核有关。成核发生时过冷度最大,因此湿蒸汽在第6级中的热力学损失比较大且为该级主要的湿汽损失项。通常,末级中的超声速流动也会引起一定的过冷度,导致二次成核发生,从图4还可以看到,该级组末级中的热力学损失比较大,其余湿蒸汽级的热力学损失均比较小。非平衡凝结流动中一次水滴的直径在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下,与汽流的速度滑移很小,因此一次水滴的阻力损失占湿汽损失的比例较小。但是,一次水滴在流动过程中会不断生长,末级时直径达到最大,与汽流的速度滑移也达到最大,因此末级中水滴阻力损失占湿汽损失的比例比其余各级都大。

二次水滴是由叶片表面的水膜在尾缘被汽流撕裂形成的,二次水滴的质量分数逐级增大,产生的损

失主要为制动损失。图 5 为按照临界韦伯数计算得到的静叶尾缘处二次水滴的直径分布。凝结开始发生的第 6 级静叶中,二次水滴的直径只有 6 μm 左右,数量也少,因此制动损失较小;沿着流动方向二次水滴的直径逐级增大,制动损失也逐级增加,第 7~9 级中湿汽损失主要是制动损失;第 10 级静叶叶顶二次水滴的直径约为 90 μm ,但该级静叶采用了空心除湿结构,相应的二次水滴的数量有所减少,该级的制动损失有所下降,仍为主要的湿汽损失项。

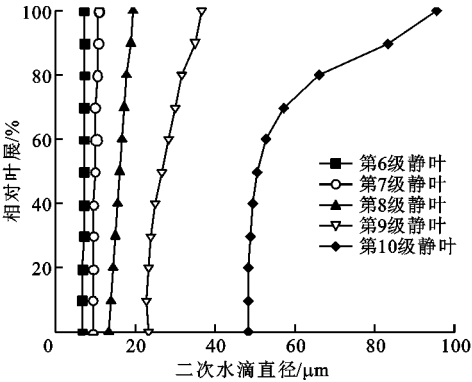


图 5 静叶尾缘处二次水滴的直径分布

疏水损失和离心损失是由水滴在叶片表面沉积产生的,这 2 项损失均逐级增大,但占湿汽损失的比例相对较小。表 1 为级中各种损失占级湿汽损失的比例。

表 1 级中各种损失占级湿汽损失的比例 %

级编号	热力学损失	水滴阻力损失	制动损失	疏水损失	离心损失
6	87.66	0.43	5.79	4.85	1.27
7	13.16	0.91	67.37	15.20	3.36
8	2.94	0.47	83.90	9.81	2.87
9	2.56	0.75	83.10	9.62	3.97
10	13.67	6.64	62.21	10.54	6.94

图 6 为低压缸各级湿汽损失计算结果与 Baumann 估算结果的对比。从图 6 可以看到,除开始发生非平衡凝结的第 6 级以外,本文中其余各级的湿汽损失均比 Baumann 估算结果小,这与文献[3-4]结果一致。究其原因,是 Baumann 公式发表于 1912 年,是当时汽轮机水平的一种经验性的总结,对湿汽损失的估算忽略了湿蒸汽中各种尺寸水滴的构成及不同形态水分引起湿汽损失的机理差异。例如,末级中二次水滴累积数量和直径增大,同时二次成核形成了新的一次水滴,各种尺寸水滴的分布是不均匀的,这就是末级中计算结果与 Baumann 估算

结果存在差异的主要原因。

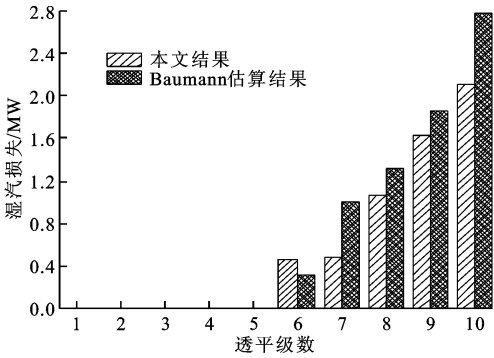


图 6 各级湿汽损失计算结果的对比

本文计算结果中,5 个级总的湿汽损失占低压缸总功率的 3.1%,而 Baumann 估算得到的结果为 3.9%。

文献[5]在流线曲率法计算结果的基础上实现了湿汽损失的计算,并与 Baumann 估算结果进行了对比,其结果与本文结论相同,即开始发生非平衡凝结的级湿汽损失较大,其余各级的较小。文献[7]采用湿汽损失程序对某湿蒸汽透平的湿汽损失进行了计算,并与实验测量结果进行了对比,结果显示二者基本吻合,从而证明了本文湿汽损失的计算程序是合理和正确的。

5 结 论

本文发展了定量计算汽轮机中湿汽损失的方法和程序。该方法以汽轮机内非平衡凝结流动的三维计算结果为基础,充分考虑了湿蒸汽级内一次水滴和二次水滴的尺寸、质量分数及空间分布,可以详细计算各湿蒸汽级中的热力学损失、水滴阻力损失、制动损失、疏水损失和离心损失。对某 1 000 MW 核电汽轮机低压缸内湿汽损失的计算表明:热力学损失在成核发生的透平级和末级中较大,中间各级较小;水滴阻力损失占末级透平湿汽损失的比例较大;制动损失逐级增加,是各级中主要的湿汽损失项,其余损失所占比例较小。总的湿汽损失占低压缸总功率的 3.1%,比 Baumann 估算的 3.9%小。

参考文献:

[1] MOORE M J, SIEVERDING C H. Two-phase steam flow in turbines and separators [M]. Washington DC, USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1976.

[2] BAUMANN K. Recent developments in steam turbine practice [J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers, 1912, 48(213): 768-842.

- [3] HESKETH J A, WALKER P J. Effects of wetness in steam turbines [J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2005, 219(12): 1301-1314.
- [4] KREITMEIER F, GREIM R, CONGIU F, et al. Experimental and numerical analyses of relaxation processes in LP steam turbines [J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2005, 219 (12): 1411-1436.
- [5] LAALI A R. A new approach for assessment of the wetness losses in steam turbines [D]. Chatou, France: Electricité de France, 1991.
- [6] GUO T, SUMNER W J, HOFER D C. Development of highly efficient nuclear HP steam turbines using physics based moisture loss models [C]// Proceeding of ASME Turbo Expo 2007. New York, USA: ASME, 2007: 825-833.
- [7] KAWAGISHI H, ONODA A, SHIBUKAWA N, et al. Development of moisture loss models in steam turbines [J/OL]. Heat Transfer — Asian Research, 2011 [2012-12-15]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/htj.20395/>.
- [8] LI Liang, LI Yu, WU Lianwei, et al. Numerical study on condensing flow in low pressure cylinder of a 300 MW steam turbine [C]// Proceeding of ASME Turbo Expo 2010. New York, USA: ASME, 2010: 2289-2296.
- [9] STARZMANN J, CASEY M, SIEVERDING F. Non-equilibrium condensation effects on the flow field and the performance of a low pressure steam turbine [C]// Proceeding of ASME Turbo Expo 2010. New York, USA: ASME, 2010: 2199-2208.
- [10] LI Liang, FENG zhenping, LI Guojun. Numerical simulation of wet steam condensing flow with an Eulerian/Eulerian model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16(2): 156-159.
- [11] 李亮, 丰镇平, 李国君. 透平级内动静干涉对凝结特性影响的数值研究 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28 (S1): 89-92.
LI Liang, FENG Zhenping, LI Guojun. Numerical study on the influence of stator-rotor interaction on condensing flow [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(S1): 89-92.
- [12] LI Liang, FENG zhenping, LI Guojun. Study on effects of spontaneous condensing on performance of low pressure stages in a steam turbine [C]// Proceeding of ASME Turbo Expo 2006. New York, USA: ASME,

2006: 1545-1553.

- [13] MORSE S A, ALEXANDER A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems [J]. Journal of Fluid Mech, 1972, 55(2): 193-208.

[本刊相关文献链接]

- 王建录, 成冰, 赵万华, 等. 汽轮机长叶片型面双刀加工刀位轨迹优化算法. 2013, 47(9): 65-71. [doi: 10.7652/xjtuxb201309011]
- 霍文浩, 晏鑫, 李军, 等. 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统冷却特性研究. 2013, 47(5): 24-30. [doi: 10.7652/xjtuxb201305005]
- 霍文浩, 晏鑫, 李军, 等. 超超临界汽轮机高压缸旁路冷却系统流动特性的研究. 2013, 47(3): 42-47. [doi: 10.7652/xjtuxb201303008]
- 邵帅, 邓清华, 时和双, 等. 不同容积流量下汽轮机低压缸末三级定常流动数值研究. 2013, 47(1): 15-20. [doi: 10.7652/xjtuxb201301004]
- 潘家成, 徐亮, 高建民, 等. 轴向间距对二次水滴运动特性及沉积规律的影响. 2012, 46(7): 1-6. [doi: 10.7652/xjtuxb201207001]
- 蔡柳溪, 王顺森, 毛靖儒, 等. 静叶斜置对高参数汽轮机再热后第一级叶栅冲蚀的影响. 2012, 46(7): 12-15. [doi: 10.7652/xjtuxb201207003]
- 李瑜, 李亮, 钟刚云, 等. 末级透平对低压缸气动和凝结特性的影响. 2012, 46(7): 16-20. [doi: 10.7652/xjtuxb201207004]
- 屈焕成, 张荻, 谢永慧, 等. 汽轮机调节级非定常流动的数值模拟及汽流激振力研究. 2011, 45(11): 39-44. [doi: 10.7652/xjtuxb201111008]
- 霍文浩, 祁明旭, 李军, 等. 超临界汽轮机中压透平级流动传热特性研究. 2011, 45(7): 9-14. [doi: 10.7652/xjtuxb201107003]
- 文乐, 高林, 戴义平. 透平压缩机组的模糊PID控制与特性研究. 2011, 45(7): 76-81. [doi: 10.7652/xjtuxb201107015]
- 何伟峰, 戴义平. 环境风速对空冷凝汽器运行性能的影响. 2011, 45(5): 31-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201105006]
- 刘钊, 丰镇平, 宋立明. 实际叶片前缘冲击冷却流动和换热的数值研究. 2011, 45(1): 5-9. [doi: 10.7652/xjtuxb201101002]
- 何伟峰, 戴义平, 马庆中, 等. 环境风影响下直接空冷单元背压预测研究. 2011, 45(1): 15-20. [doi: 10.7652/xjtuxb201101004]
- 钟杰, 郭成, 岳朋, 等. 43"汽轮机叶片材料热变形行为及制坯工艺参数优化. 2011, 45(1): 94-98. [doi: 10.7652/xjtuxb201101019]

(编辑 苗凌)