文章编号:1001-2060(2008)04-0344-04

汽轮机凝汽器喉部流动性能的微型模化试验研究

张磊磊,崔国民,高孝忠,关 欣 (上海理工大学热工程研究所,上海 200093)

摘 要:应用相似性原理,在满足流动状态相同的前提下,采 用模型吹风的方法,建立了 一套凝汽器喉部的微型模化装 置,对不同入口流速条件下喉部流动性能进行了试验研究。 试验结果表明:该凝汽器微型模化试验装置不但减小了模型 尺寸,降低了试验成本及提高了试验的方便性,而且该试验 装置能够复现喉部内的流动情况,可用于其阻力性能和流动 状态的试验研究。

关 键 词:凝汽器喉部;微型模化装置;流动阻力;相似性 理论

中图分类号: TK124 文献标识码: A

引 言

汽轮机凝汽器喉部是汽轮机的一个重要辅助设备, 其整体性能对汽轮机的工作效率具有很重要的影响。从结构上看喉部是一个异常复杂的蒸汽通道, 为了使汽流的部分动能转化为压力能, 降低蒸汽流经喉部的压力损失, 其通常被设计成具有一定扩散角度的棱台形结构, 内部还布置有大量的支撑管件和一些抽汽管。衡量喉部整体性能的最主要指标有两个: 一是喉部蒸汽的流动汽阻, 过大的汽阻将直接影响到汽轮机的效率, 如当汽轮机的压力损失为133 Pa时, 汽轮机的效率将降低 0.08%; 二是喉部出口流场的均匀性, 当汽轮机的排汽流经喉部后, 将形成极不均匀的流动分布情况, 所产生的局部高速汽流会造成下级冷却管的汽流激振^{1]}。

目前对于喉部流动性能的研究主要有两个方 向:数值模拟计算和模化试验研究。在数值模拟计 算研究方面,主要方法有DSMC、*k*—ε结合壁面函数 法等^{[2~3},但该方法存在建模比较困难、计算速度慢 等缺点;另一方面就是通过模化试验研究来获取喉 部的流动阻力,一般采用的模型缩小比例为1:10, 如日本日立公司曾在喉部的流动特性方面做过试验 研究^[4~3],但这种方法在研究过程中存在试验成本 高、投入周期长及实验进展缓慢等缺点。 为更好地研究喉部结构对蒸汽流动阻力性能的 影响,本文在以往模型吹风试验的基础上,建立了凝 汽器喉部的微型模化试验装置,减小了模化试验装 置的比例尺寸,同时对测试本体(喉部)采用柔性设 计,力求降低试验成本,缩短试验周期。

1 微型模化装置的建立

该微型模化试验的总体设想为:在满足相似性 理论的前提下,采用模型吹风试验的方法,以风机代 替蒸汽轮机,应用流动空气代替汽轮机排汽口排出 的蒸汽,试验模型的缩小比例达到1:30。

1.1 相似性分析

根据相似理论及气动力学空气吹风试验原理,为 了再现实体内的流动状态,实体和模型之间的流动完 全相似的充要条件是^{6]}:几何尺寸相似,*Ma*(马赫 数)、*Re*(雷诺数)、*Fr*(弗鲁德数)、*Eu*(欧拉数)、*Sr*(斯 特劳哈尔数)等准则数对应相等。但是在实际情况 下,完全满足相似准则是非常困难的,即便是文献[4] 中模型缩小比例采用 1:10 的条件下,也不能满足准 则数的完全相等。考虑到蒸汽在从低压汽轮机末级 叶片出口端至凝汽器喉部出口端之间的流动中重力 不起主要作用,所以 *Fr* 可以不考虑;与流体的压缩性 有关的 *Ma*,在实际情况下很小,也可以认为其对喉部 的内部流动影响不大;而当流动工质可视为无粘性流 体或流动的 *Re* 很大时,也可以不考虑 *Re* 的相等,但 必需满足两者之间的流态相同;而由于喉部流场中压 力为非定值,因此 *Eu* 须满足为等量。

1.2 量纲分析

在模化试验过程中存在一个很重要的问题:如 何将模型测量的数据转换到实体。解决该问题通常 是采用量纲分析的方法,其目的就是要把影响目标 量的各个变量组合起来,并找出实体与模型之间的

收稿日期: 2007-08-06; 修订日期: 2007-10-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20406011);上海市重大科技攻关基金资助项目(05dzl2028);上海市教育委员会发展基金资助项目(07ZZ85) 作者简介:张磊磊(19%fm): 男。宏徽亳州人。上海理正太学在读硕屯研究伟ng House. All rights reserved. http://www.cnki.net 转换关系式。

该模化试验过程中测量的目标量为喉部的压力 损失 ΔP,与目标量相关联的变量主要包括:工质流 量 Q、喉部的入口面积 A、流体密度 ^e 以及流体的动 力粘度 ^μ。压力损失和各变量之间的函数关系式可 表示为:

$$\Delta P = f(Q, A, \rho, \mu) \tag{1}$$

选取长度 L、质量 M、时间 T 为基本量纲,则目 标量和各关联量的量纲如表 1 所示。

物理量	量纲
Q	$L^{3}T^{-1}$
Α	L^2
Q Q	ML^{-3}
μ	$\mathrm{ML}^{-1}\mathrm{T}^{-1}$
$\Delta \! P$	$ML^{-1}T^{-2}$

表1 目标量和各关联量的量纲

选取 $\mu_{\chi}\rho_{\chi}A$ 为独立变量,则 ΔP 和 Q 可表示成 这 3 个独立变量的幂次形式:

 $[\Delta P] = [\mu]^{x} [\rho]^{y} [A]^{z}$ (2) $[Q] = [\mu]^{x^{1}} [\rho]^{y^{1}} [A]^{z^{1}}$ (3)

由量纲的齐次性求解式(2)和式(3)可得:x=2,

 $y=-1, z=-1; x_1=1, y_1=-1, z_1=1/2.$

则式(1)可表示为:

$$\Delta P = \frac{\mu^2}{\rho_A} \left(\frac{Q}{\mu \rho^{-1} A^{V2}} \right) = \frac{\mu^2}{\rho_A} \left(v \cdot \frac{A^{V2}}{\mu \rho^{-1}} \right)$$
(4)

式中:v一喉部的入口流速。由模拟计算可知,喉部

阻力与入口流速成二次方关系,则:

$$\Delta P_{s} = \frac{\frac{\mu_{s}^{2}}{\rho_{s}A_{s}} \left[v_{s} \frac{A_{s}^{V2}}{\mu_{s}\rho_{s}^{-1}} \right]^{2}}{\frac{\mu_{m}^{2}}{\rho_{m}A_{m}} \left[v_{m} \frac{A_{m}^{1/2}}{\mu_{m}\rho_{m}^{-1}} \right]^{2}} \Delta P_{m} = \left(\frac{\rho_{s}}{\rho_{m}} \right) \left(\frac{v_{s}}{v_{m}} \right)^{2} \Delta P_{m} \quad (5)$$

式中:下标 m —模型参数; s —实体参数。实体中喉 部入口蒸汽的密度 $\rho_s = 0.036$ 62 kg/m³,模型采用工 质的密度 $\rho_m = 1.205$ kg/m³。则:

$$\Delta P_{s} = \left(\frac{0.036\ 62}{1.205}\right) \left(\frac{v_{s}}{v_{m}}\right)^{2} \Delta P_{m} = 0.030\ 39 \left(\frac{v_{s}}{v_{m}}\right)^{2} \Delta P_{m}$$
(6)

式(6)为模型与实体之间压力损失的转换关系 式。

因此,由上述相似性分析和量纲分析可得:该微型模化试验主要考虑几何尺寸相似、Eu 相等和满足相同流态3个前提条件^[7],即:

$$\frac{L_s}{L_m} = k_1 \quad \frac{Re_s}{Re_m} = k_2 \quad \frac{Eu_s}{Eu_m} = 1 \tag{7}$$

式(7)中 k_1 为模型缩小比例,其值为 30; k_2 为 实体和模型之间 Re 的比值,由于要满足两者均处 于旺盛紊流区,其取值应限定在一定范围内。在试 验条件下,为满足流态达到旺盛紊流区,试验设定工 质入口流速的最小值为 19.2 m/s,对应最小的入口 Re 为 3.01×10⁵,这样就满足了两者处于相同流态 的要求^[8]。表2 给出了 5 个试验工况条件下模型的 入口流速和 Re 以及 k_2 取不同值时分别对应实体的 入口流速和 Re。

表 2 不同试验工况及 k2条件下模型和实体入口流速和对应 Re

实验	模型入口参数		实体入口参数(k2=6)		实体入口参数(k2=8)		实体入口参数(k ₂ =10)	
工况	流速/ m°s ⁻¹	Re	流速/m°s ⁻¹	Re	流速/ m°s ⁻¹	Re	流速/m°s ⁻¹	Re
工况 1	19.2	3.01E + 05	95.1	1.81E+06	126.0	2.41E+06	157.5	3.01E+06
工况 2	22.5	$3.51E \pm 05$	111.2	2.11E+06	147.3	2.81E+06	184.1	3.51E+06
工况 3	26.4	4.15E+05	130.9	2.49E+06	173.4	3.32E+06	216.8	4.15E+06
工况 4	30.7	4.81E+05	152.2	2.89E+06	201.7	3.85E+06	252.1	4.81E+06
工况 5	32.2	5.04E + 05	159.5	3.02E+06	211.3	4.03E+06	264.2	$5.04E \pm 06$

1.3 喉部结构模型的建立



以某600 MW 机组凝汽器喉部为例,采用1:30



图1 采用柔性设计的喉部壳体模型

图2 喉部内部设备布置

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

的模型缩小比例。具体的喉部壳体模型及内部设备

布置和结构参数如图 1、图 2 和表 3 所示。

表 3 喉部模型的尺寸参数^[2]

	凝汽器喉部外形/m			低压加热器/m		抽汽管/ m		支撑管/m	
	入口尺寸	出口尺寸	高度	直径	高度	直径	总长度	直径	总长度
模型	0.223 × 0.253	0.403×0.253	0. 154	0.061	0.065	0. 021	0. 5985	0.004	26.99

1.4 微型模化试验装置的设计方案
 图 3 为试验装置及测试系统图,试验设备沿箭

头方向依次布置。该试验装置主要包括:送风系统、 实验系统和微机控制系统3个部分^[9]。



图 3 试验装置及测试系统图

送风系统由风机、变频器、变径管、消声器、方形 管道和导流管组成。其中风机为调频风机,通过改 变风机的转速来调节送风量;风机的出风口通过软 连接依次与变径管、消声器、管道、喉部模型和导流 管相连接。

实验系统由喉部模型和测量系统组成。其中喉 部模型采用柔性设计,如图1所示,可以任意调节喉 部扩散角度、内部低压加热器高度、直径以及支撑管 的支撑方式;测量系统包括压力传感器、流速测量仪 等测量设备。

微机控制系统由数据采集系统、计算机、电源和 控制柜等组成。计算机通过数据采集系统分别与喉 部模型上的压力传感器和流速测量仪连接,计算机 与电源、控制柜和风机串联连接。

2 试验结果处理与分析

采用上述试验方案,就工质入口流速对出口流 场分布和喉部流动阻力进行了试验研究。

图4表示入口流速为 32.2 m/s 时喉部出口流场 分布。从图中可以看出,整个出口流场分布极不均 匀,可分为低压加热器下方的低速流区和低压加热器 两侧的高速流区。造成速度分布不均匀的主要原因 有两点:一是蒸汽绕低压加热器流动时的阻滞作用, 使得低压加热器下方区域的流体速度降低;二是大量 支撑管件的加入进一步扰乱了流场的分布。

图 5~图 7 分别表示实体和模型的入口 Re 之 比k2 等于 6.8,10 时 3 种工况条件下的试验结果和 模拟结果的比较。由图可得:无论模拟计算和试验 研究,喉部的流动汽阻均与蒸汽入口流速成二次方 关系;另外,从图中可以看出两者之间存在一定的偏 差,但偏差并不随试验入口流速的变化而发生明显 变化,而是随 Re 之比 k_2 的增大,两者之间的相对偏 差逐渐减小。定义 [§]为试验结果的修正系数,[§]随 k_2 的变化关系如图 8 所示。



图4 入口流速为 32.2 m/s 时喉部出口流场分布





¹/1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



图6 k3=8 时试验结果和模拟结果的比较



k2=10时试验结果和模拟结果的比较 图 7



修正系数 ⁵ 与 Re 之比 k2 的关系 图 8

从图 8 中修正系数 $\xi = Re$ 之比 k_2 的关系可以 看出,修正系数随入口 Re 之比的增大而减小,即入 口 Re 之比越大,试验结果与模拟结果之间的相对 误差越小。造成这种现象的原因主要是:虽然喉部 模型和实体的入口 Re 均处于旺盛紊流区, 但模化 试验与实际情况并没有完全相似,试验结果还是与 试验入口 Re 具有一定的关系。

试验系统不确定度分析对喉部阻力的测量方法 为间接测量,是通过测量喉部进、出口的速度,并采 用下列公式得出:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \left(\bar{\nu}_1^2 - \bar{\nu}_2^2 \right) \tag{8}$$

试验中采用速度测量仪表精度等级为1级,速 度测量不确定度为 0.3 m/s 时的置信度为 99.7%, 即速度测量结果可表示为:

 $v = \bar{v} \pm 0.3$ (置信度 99.7%) 不确定度的关系可表示为:

$$\sigma_{\Delta P} = \rho_{\nu} \sqrt{\bar{\nu}_{1}^{2} \sigma_{\nu 1}^{2} + \bar{\nu}_{2}^{2} \sigma_{\nu 2}^{2}}$$
(9)

式中: σ_{v1}、σ_{v2}表示速度测量的不确定度, 其值均为 0.3 m/s,则阻力测量结果可以表示为:

 $\Delta P = \Delta P \pm 0.3^{\rho} \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$ $=505.1\pm12.8$ (置信度 99.7%) 置信区间为[492.3,517.9]。

结 论 3

在以往凝汽器喉部模型吹风试验的基础上,建 立了一种微型模化试验装置,对该试验装置进行相 似性分析,应用量纲分析方法把影响目标量的各个 变量组合起来,找出实体与模型之间的转换关系式; 然后给出了整个微型模化试验装置的设计方案,并 利用该微型模化试验装置对喉部的流场分布和流动 阻力进行了试验研究,得到了如下结论:

(1) 凝汽器喉部出口流场分布极不均匀,在低 压加热器下方和斜壁区域流体速度较低,而低压加 热器两侧为高速流区,大量支撑管件的存在使得流 体的分布更加地不均匀:

(2) 喉部的流动汽阻与流体入口流速成二次方 关系:

(3) 由于模化试验与实际情况不可能完全相 似,喉部阻力的试验结果转换到实际状态下时,与模 拟计算结果之间尚存在一定的偏差, 即当 Re 比值 不同时,其流阻修正系数介于1.10~1.30之间。

参考文献:

- 张卓澄. 大型电站凝汽器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. [1]
- 崔国民. 汽轮机凝汽器喉部合理设计及布置研究[R]. 上海: [2] 上海理工大学,2000
- 曹丽华,郭婷婷,李 勇.300 MW 汽轮机凝汽器喉部出口流场 [3] 的三维数值模拟[]]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 56-59.
- [4] 安平纪雄 佐藤武 向井康晃 关于凝结器喉部流动特性的实验研 究//国外凝汽器论文集 Q. 成都:东方汽轮机厂, 1983 58-70
- WANG J, PRIESTMAN G H, WU D. A theoretical model of uniform [5] flow distribution for the admission of high-energy fluids to a surface steam condenser[J]. Journal of Engineering for Gas Tuebines and Power, 2001, 123; 472-475.
- 林建忠, 阮晓东, 陈邦国, 等. 流体力学[M]. 北京:清华大学出 [6] 版社,2005.
- [7] 崔国民,张磊磊,王方方、凝汽器喉部结构优化的理论及模化 研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 131-133.
- 张磊磊,崔国民、小型凝汽器喉部实验装置的可行性研究[]]. [8] 机电设备, 2005, 22(6): 45-47.
- [9] ZWEBEK A I, PILIDIS P. Degradation effects on combined cycle power plant performance-part III; gas and steam turbine component degradation effects[J] . Transactions of the ASME, 2004, 126: 306-315.

伟)

由式 (8)得, 喉部阻力测量不确定度与流速测量 blishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

我国电站锅炉煤粉直接点火技术的发展以及现状= Development and Status Quo of Utility-boiler Pulverizedcoal Direct-ignition Technologies in China [刊,汉] / NIE Xin (College of Mechanical Engineering, Hangzhou University of Electronic Science and Technology, Hangzhou, China, Post Code: 310038), ZHOU Jun-hu, WANG Yang, CEN Ke-fa (National Key Laboratory on Clean Utilization of Energy Sources, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2008, 23(4). -333~337

The working principles and burner structures of various pulverized-coal direct-ignition technologies currently available in China as well as their development and application status are expounded along with the respective merits and demerits being pinpointed. Several omnipresent problems concerning the safety of the burners in question are summarized. To solve the contradiction between the operation safety and oil savings now troubling the power generation industry of China, two approaches were proposed: the first approach involves the adoption of multiple regulating means to reduce the pulverizedcoal flow ignition heating, and the second is to integrate the use of direct-ignition technology with traditional ignition oil guns. It should be noted that high-temperature air direct-ignition technology enjoys a relatively high technical advantage due to its flexible regulating means. **Key words:** pulverized coal, oil saving, direct ignition, safe operation, ignition heat

PG9171E 型燃气轮机变工况计算模型的建立= Modeling for the Calculation of Off design Operating Conditions of a Model PG9171E Gas Turbine[刊,汉] / XIA Di, WANG Yong-hong (Turbo-machinery Research Institute, Shang-hai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2008, 23(4). - 338 ~ 343

To set up a calculation model for the off-design conditions of a PG9171E gas turbine, it is necessary to identify the compressor characteristics of the gas turbine in question on the basis of the original data provided by the power plant. As the current base-line estimation method was established without considering any experimental data of compressors at highpressure ratios, in general, it can only be used for the estimation of compressor characteristics at a pressure ratio less than 11. However, the pressure ratio of the PG9171E gas turbine compressor has already approximated to 12. To solve this problem, a section-by-section calculation method was for the first time proposed for the calculation of compressor characteristics. The calculation results show that the accuracy of the above method can meet the requirement of practical applications. In respect of the calculation of thermodynamic properties involved in an off-design condition calculation model, a general-purpose relationship for the thermodynamic properties of air, CH₂ gas, C gas and steam was inducted based on thermodynamic properties table No. 2. This simplifies the calculation process of wet combustion gas enthalpy and logarithmic pressure ratio values when the combustor operates on heavy fuel oil. A comparison of the calculation results of the offdesign condition calculation model with the actually measured parameters of the gas turbine shows that the above-mentioned improved method can meet the requirement for the modeling accuracy in practical applications. **Key words:** compressor characteristics, combustion gas thermodynamic properties, off-design condition calculation model

汽轮机凝汽器喉部流动性能的微型模化试验研究= Experimental Study of Micro-modeling of Flow Performances in the Condenser Inlet of a Steam Turbine[刊,汉] / ZHANG Lei-lei, CUI Guo-min, GAO Xiao-zhong, et al (Thermodynamic Engineering Research Institute, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2008, 23(4). - 344~347

Under the precondition of ensuring an identical flow state and by using similarity theory and a method under which a model is subjected to a blowdown in a wind tunnel, established was a set of miniature modeling device for a condenser inlet. An experimental study has been conducted of the flow performances at the condenser inlet under different inlet-flow speeds. The test results show that the modeling test device in question can not only reduce the size of the model and the cost of testing, facilitating the conduct of the test, but also achieve a repeatability of the flow conditions in the condenser inlet. It can be used for the experimental study of the flow friction performance and flow conditions of any condenser inlet. **Key words:** condenser inlet, miniature-modeling device, flow friction, similarity theory

随机参数汽轮机叶片频率的随机有限元分析=Stochastic Finite Element Analysis of Turbine Blade Frequencies at Random Parameters[刊,汉] / AN Li-qiang, WANG Zhang-qi (Mechanical Engineering Department, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003)// Journal of Engineering for Thermal Energy &