

汽轮机调节阀设计的新思路

相晓伟, 毛靖儒, 孙 弼

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 在分析了现有汽轮机调节阀设计方法的基础上指出其不足, 并提出了阀门设计的新思路。在新思路中引入数值计算的步骤, 通过对调节阀流场的数值模拟, 掌握阀门内部的细节流动信息。在此基础上找出流场不合理的问题所在, 并通过适当措施改善和优化内部流场结构, 以达到提高阀门气动性能的目的。然后对优化后的阀门进行模型试验, 最终完成阀门设计。此外还研究了调节阀三维流场的计算方法, 并根据新的阀门设计思路中所提出的以数值计算为依据来优化流场的思想, 对一具体算例进行了数值计算, 针对流场中所存在的问题, 对阀门型线进行适当的调整, 从而改善了气动性能。

关 键 词: 汽轮机调节阀; 设计方法; 调节阀三维流场

中图分类号: TK263.7 文献标识码: A

1 前 言

汽轮机的启停和功率的变化是通过调节阀开度的变化, 从而改变进入汽轮机的蒸汽流量或蒸汽参数来实现的。作为汽轮机进汽机构的重要组成部分, 调节阀气动性能的好坏会对整个汽轮机机组的经济性产生直接的影响。另外, 调节阀中阀体的振动现象也存在于实际的运行中, 类似阀杆振动、阀杆断裂、阀座拔起等事故曾经发生^[1~2], 直接影响了机组的安全工作。造成阀体振动的主要原因是调节阀内气流流动的不稳定^[3], 而气流流动的不稳定又与流动的边界有密切的关系。不合理的流动边界使流体的流动无法控制, 流动中产生的扰动向外扩散和不断增长, 从而造成了气流流动的不稳定。因此, 无论是从经济性的角度还是安全性的角度来考虑, 研究和分析汽轮机调节阀的内部流场, 优化其气动性能, 减小流动损失和稳定气流, 提高调节阀的流动效率和安全性, 最终设计出气动性能良好的调节阀无疑有重要的工程实际意义。

2 汽轮机调节阀设计的现状

目前调节阀结构优化主要基于冷态单阀体对比试验, 获得流量特性、卸载室特性、提升力和相对稳定性基本特性, 从中挑选出较优的型线组合方案, 提供定常条件下的设计依据。实际调节阀设计计算主要依据流动相似理论、流体力学的相关原理和冷态试验数据来确定设计工况条件下几个关键部位尺寸, 比如调节阀配合直径、阀座喉部和出口直径。传统设计方法比较简单, 对大部分定常流态的运行负荷仍是可靠的。

流动相似理论指出: 动力相似需要模型和实物两种流动在时空相似条件下各相似准则数都相等。与常规流体机械不同, 汽轮机调节阀内产生非定常流动现象不仅随机性强, 而且极其微妙和敏感。运行现场很难准确捕获发生流固耦合现象的根源所在, 模化试验又难于真实重现不稳定现象。正是这些原因, 调节阀模化设计欠缺实测和试验数据, 更谈不上掌握其内部流动规律, 限制了相似理论的应用, 例如 Strouhal 时间相似准数中参数的确定至今缺乏研究。也就是说调节阀发生流固耦合现象所涉及的非定常流动缺乏模化设计方法。显然, 从模型设计、加工、试验到数据转换到真实调节阀工作状态的实物设计完成, 整个过程不仅周期长花费大, 而且存在不少的不确定性, 改进调节阀设计方法是十分必要的。

3 调节阀设计的新思路

近年来, 随着计算流体力学和计算机技术的飞速发展, 采用数值模拟手段对复杂流动问题进行研究成为可能。数值模拟手段不仅可以节约大量的人

力和资金,最重要的特点是可以模拟和展现调节阀真实工作在高温高压状态下时其内部流动参数的变化和分布规律,尤其对全负荷变化范围都可以进行细节信息的获取。尽管调节阀内的非定常流动数值模拟研究还达不到实际要求,但在设计前首先进行调节阀全工况范围的三维真实工作参数和介质的数值模拟研究不仅弥补了试验研究的短缺,更重要的是可提供试验无法获得的数据。如

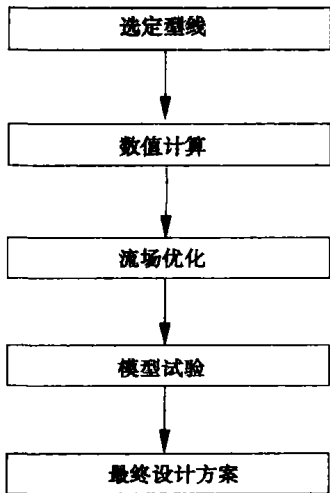


图 1 调节阀新设计思路的流程图

为设计人员提供全面完整的流场信息,从而为降低流动损失、改善阀门稳定性提供思路,并能预测调节阀运行实况。新的设计方法应该是先选出多种阀门型线组合方案,然后进行大量的数值模拟,从计算结果中获得一定量指导性依据后,针对不同使用要求和配汽方式再进行内部流场结构的优化,以完善设计。模化试验仅对典型工况和挑选的阀门型式进行。最终结合试验和运行数据形成完整的设计方案,其设计流程如图 1 所示。本思路对完善传统设计方法不仅必要,而且完全可行,既可节省大量的试验经费,又可使设计水平显著提高。

基于上述思路,文中将介绍调节阀三维流场的数值计算方法,并且对某特定工况下的调节阀流场进行数值计算。在充分掌握阀门流动特性和细节流动信息的基础上,对阀内流场进行初步优化。

4 数值计算方法

4.1 几何结构及湍流模型

我们以厂家提供的型线阀为例,基本结构如图 2 所示,其中三维坐标的 X 轴为气流进口方向, Y 轴为气流出口的逆方向,右手定则确定 Z 轴方向。

显然,调节阀工作在高温高压蒸汽条件下,其流动为三维、可压缩、粘性湍流流动。计算采用三维雷诺平均守恒型 Navier—Stokes 方程,湍流模型先后选

用了 Realizable $k-\epsilon$ 模型和标准 $k-\epsilon$ 模型,经比较,两者计算结果差别不明显,最终选用较常用的标准 $k-\epsilon$ 湍流模型。采用二阶差分格式离散方程,用 SIMPLE 算法求解控制方程。计算采用文献[4]中的气体状态方程:

$$P = \rho R T a (1 + B\rho + C\rho^2)$$

其中: P —气体压力; ρ —气体密度; R —气体常数; T —气体温度; B 和 C —系数。

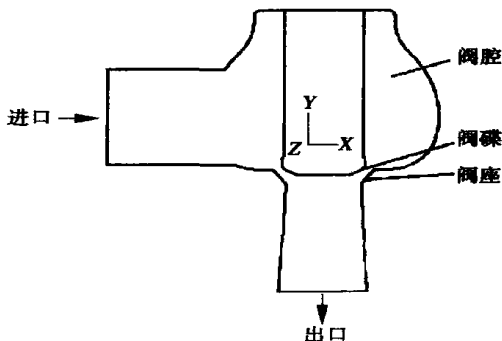


图 2 汽轮机调节阀结构示意图

4.2 计算网格和边界条件

由于调节阀型腔结构复杂,采用分块结构化网格,图 3 给出了调节阀的三维计算网格示意。基于阀门结构的对称性,计算时取其一半即可,网格单元数约为 90 万。

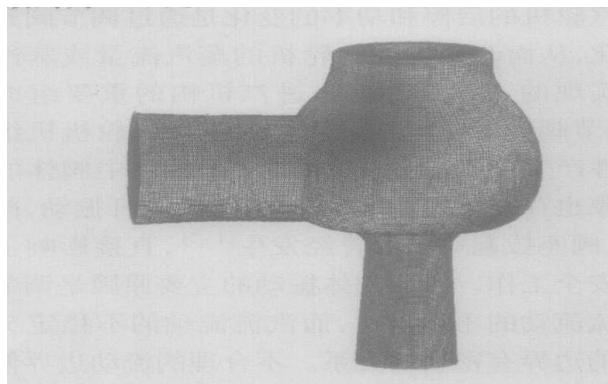


图 3 调节阀的三维计算网格

边界条件按设计数据给定的参数,进口参数为:进口总压 P_0 和总温 T_0 ,出口为静压 P_1 。因调节阀外壁有保温措施,所以壁面采用绝热假定与实际有非常好的近似。对壁面附近的粘性支层的处理有两种方法,即低 Re 模型和壁面函数法。壁面函数法采用半经验公式来反映壁面对近壁区流动的影响,在工程湍流的计算中得到了较为广泛的应用。壁面

函数法又可分为两种: 标准壁面函数法和非平衡壁面函数法, 本文采用标准壁面函数法。汽流进口考虑到电厂锅炉管道经过长距离输送的充分混合后均匀进入到汽轮机, 因此, 计算时调节阀进口边界汽流参数认为是均匀的, 同时只有沿管道的轴向速度 V_{in} 。进口湍流脉动动能 K_{in} 及耗散率 ϵ_{in} 参照管流经验公式:

$$K_{in} = 0.5\% \times V_{in}^2$$

$$\epsilon_{in} = K_{in}^{3/2} C_{\mu}^{3/4} / \delta$$

式中: $C_{\mu} = 0.09$, δ —进口截面的当量半径。

5 算例分析

据厂家提供的数据, 调节阀的配合直径 D 为 125 mm, 阀进口总压 P_0 为 8.820 MPa, 进口总温 T_0 为 808 K。定义相对升程 $\bar{L} = L/D$, 其中 L 为阀门的提升高度, D 为阀门的配合直径。压比 $\epsilon = P_1/P_0$, P_1 为阀门的出口静压力。通过对此种型线阀在不同升程和不同压比条件下进行大量的数值计算, 能够掌握阀门的整体流动特性。调节阀的流道结构主要分为 3 个部分: 阀腔、阀碟下表面和阀座上表面组成的环形通道及阀座扩压通道。气流由进口流入阀腔的较大空间后, 流速有所减小, 在阀腔内汽流的气动参数基本上不发生变化, 但当气流一进入阀碟和阀座构成的环形通道后, 在极其短的行程中, 蒸汽剧烈的膨胀, 静压迅速降低, 流速快速增大, 尤其在中小升程。随着汽流流入阀座扩压段, 其静压力又会缓慢的增加直至出口。数值计算不但能够掌握调节阀的整体流动特点, 更为重要的是它可以提供阀内流场的细节信息, 从而使设计者能够通过对流场结构的分析, 找出流动不合理的问题所在, 并适当地调整现有的阀碟或者阀座的型线, 以达到改善阀门通流特性, 降低损失, 提高阀门稳定性的目的。就本文所选取的调节阀来讲, 当整个机组在额定工况下运行时, 阀门的相对升程 $\bar{L} = 28.8\%$, 压比 $\epsilon = 0.95$ 在此工况下对调节阀流场进行数值计算, 其 Ma 分布如图 4 所示。整体而言, 此工况下汽流的流速不高, Ma 数较小, 气流的流动损失不大。但是在阀碟下方的局部区域内存在的低速气流, 在这一区域内 Ma 数很小, 其值不足 0.1, 习惯上此区域被称为空穴区。空穴区的形成是因为气流以一定的角度流入阀座, 如图 5 所示。当加速汽流进入阀座时, 会使阀碟下部与气流脱离并在其下方形成一个空穴区。在粘性输运的作用下, 空穴里的气体会不断被其下游的气流带走, 这种抽吸作用会使空穴内压力下降, 形成低压区。当空穴内气体压力下降到一定程度时, 它周围的汽流就会渗入进来填补空穴, 就这样, 空穴内的汽流一边不停地被抽吸走, 一边又有汽流进来填补。这种抽吸行为是一种非稳态的流动, 空穴中气压时刻在变化, 这样就会导致作用在阀碟下部的压力也发生脉动变化, 进而可能引起阀体振动^[9]。此外对于阀门的通流特性来说, 空穴区也是“无用区”。

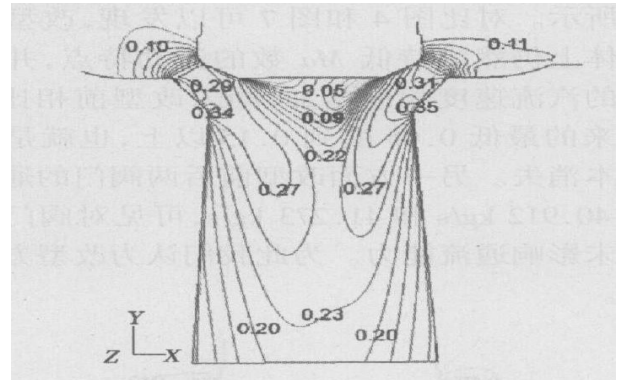


图 4 $\bar{L} = 28.8\%$, $\epsilon = 0.95$ 时中分面上的 Ma 等值线图

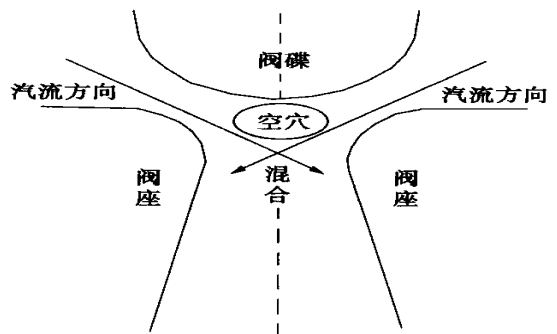


图 5 空穴区形成的结构示意图

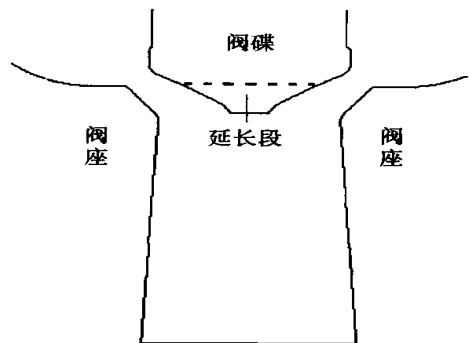


图 6 改型后的型线结构示意图

为了有效地消除空穴区对阀门稳定流动的不利影响,首先我们对图 4 所示工况的流场进行分析,最直接的想法就是用实体部分填充空穴区,为此我们在阀碟下方延长出一块和空穴区的形状大小近似相同的部分。改型后的结构如图 6 所示。

对改型后的调节阀在与改型前完全相同的进出口条件下进行数值计算。其中分面上的 Ma 数分布如图 7 所示。对比图 4 和图 7 可以发现,改型后的阀门整体上仍然维持低 Ma 数的流动特点,并且阀碟下方的汽流速度相应增加,同未改型前相比, Ma 数由原来的最低 0.05 变到 0.15 以上,也就是说空穴区基本消失。另一方面改型前后两阀门的通流量分别为 40.912 kg/s 和 41.273 kg/s,可见对阀门的改型也并未影响通流能力。为此我们认为改型方案是成功的。

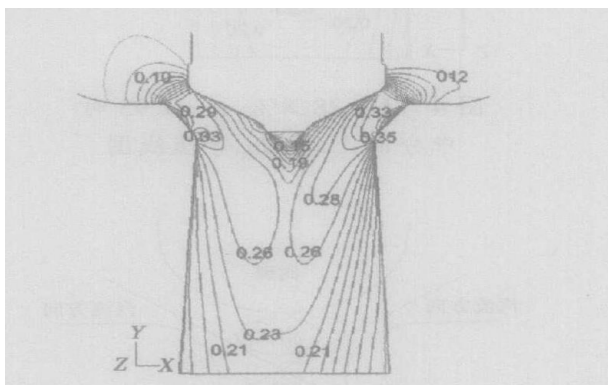


图 7 改型后调节阀中分面上的 Ma 数分布

以上我们用一个例子说明了本文所提出的新的调节阀设计思路中,通过数值计算来了解内部流场的细节,在此基础上找到流场不合理的问题所在,并通过适当的调整阀门型线来优化内部流场结构,从而达到提高阀门气动性能的目的,这也是本文所提出的新阀门设计思路中的核心部分。

6 结束语

在深入分析现有汽轮机调节阀设计方法的基础上,提出了新的调节阀设计思路。在新的设计思路中引入数值计算的步骤,通过数值计算了解阀门内部的细节流动信息,找出流场不合理的问题所在,并通过适当的措施改善和优化内部流场结构,从而达到提高阀门气动性能和增强汽流稳定性的目的。在此基础上对典型工况进行模型试验,最终完成阀门的设计。

参考文献:

- [1] 郑绍臣,高福升.汽轮机调速汽门阀杆断裂原因及结构改进[J].中国电力,1996,29(10):63-65.
- [2] 李祥苓,林西奎,寒奎政,等.国产 300 MW 机组高调节汽门阀杆断裂事故分析[J].中国电力,2002,35(10):21-24.
- [3] 毛靖儒,屠珊,刘全恩,等.汽轮机调节阀内流动特性的试验研究[J].工程热物理学报,2002,23(6):687-690.
- [4] 李思琦.船用汽轮机进汽阀箱气动性能的数值研究[D].西安:西安交通大学,1998.
- [5] 杜占波,张荻,李思琦.透平进气阀箱阀体稳定性及改型方案的数值研究[J].汽轮机技术,1999,41(5):288-291.

(丹 编辑)

会 讯

燃气轮机发电专业委员会拟召开 2006 年学术年会

中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会拟定今年 10 月召开 2006 年学术年会。

本届学术年会将由中国电机工程学会总部主持联办,年会的主题为:面向生产、科技创新、效益环保。

会议将讨论交流的内容:

1. 燃气轮机联合循环电厂建设项目的设计优化、主辅设备采购、安装施工技术、设备调试;
2. 燃气轮机电厂升级改造、油改气工程技术;
3. 燃气轮机电厂设备可靠性、安全性、经济性评价;
4. 燃气轮机电厂运行、维修经验、技术创新和节能降耗技术;生产故障的分析处理;
5. 燃气轮机电厂环境污染治理和“三废”排放再利用;
6. 冷热电联供分布式能源系统工程技术,燃气轮机利用工业过程气发电技术;
7. 洁净煤联合循环发电(IGCC)能源综合利用和多联产技术;
8. 燃气轮机设备制造国产化和主要部件维修本地化的进展。

capacity increased by 2% to 8%. In this connection the gas turbines in Guangzhou City enjoy the maximum potential for performance improvement. As assessed from the aim of achieving a same increase in the power generation capacity, the installation of a cooling system at the inlet of gas turbines can contribute to a better cost-effectiveness than the case of installing new gas turbine units. **Key words:** gas turbine, inlet air cooling, cost-effectiveness

汽轮机调节阀设计的新思路 = **New Ideas for the Design of Steam Turbine Regulating Valves** [刊, 汉] / XIANG Xiao-wei, MAO Jing-ru, SUN Bi (State Key Laboratory of Multi-phase Flows in Power Engineering and Turbo-machinery Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 235 ~ 238

On the basis of analyzing currently available design methods of steam turbine regulating valves, the shortcomings of these methods are pinpointed and a new approach for designing the regulating valves is proposed. The new design method includes a numerical computation step. Through a numerical simulation of the flow field of the regulating valves, detailed flow information inside the valves is identified. On this basis, all the irrational factors in the flow field can be detected and with the adoption of proper measures the internal flow field structure improved and optimized to attain the aim of enhancing the aerodynamic performance of the valves. Thereafter, a model experiment can be conducted of the optimized valve followed by a final completion of the valve design. In addition, a calculation method for the three-dimensional flow field of the regulating valves was studied. On the basis of the new approach that the flow field can be optimized based on the numerical calculation proposed in the new design method of valves, a numerical calculation was performed of a specific calculation example. In the light of the existing problems in the flow field, an appropriate adjustment has been undertaken of the valve profile, thus improving its aerodynamic performance. **Key words:** regulating valves of steam turbines, design method, three-dimensional flow field of regulating valves

基于 CFD 的船舶自流冷却系统进水口形式优化 = **Optimization of the Types of Water Inlets in Marine Scoop Cooling Systems Based on CFD (Computational Fluid Dynamics)** [刊, 汉] / GAO Wei, MIAO Hui, HUANG Shu-hong, et al (Energy Source and Power Engineering School under the Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 239 ~ 244

The structure of water inlets of a marine scoop cooling system has a significant effect on the navigation of ships and the cooling efficiency of condensers. A numerical calculation is conducted for different types of water inlets of marine scoop cooling systems by the use of software Fluent and through the adoption of a standard $k-\epsilon$ model. The flow characteristics of different types of water inlets are analyzed from such aspects as flow rate, navigation drags and the impact of wake flow fields. The results show that with a same tube diameter, the straight tube inlet can provide a relatively large flow rate and cause a minimal effect to the external flow field. Meanwhile, the extended length of the water inlets can directly influence the flow rate and the magnitude of navigation drags. However, the impact to the wake flow is closely related to water outlets. Hence the design of water inlets should be conducted in conjunction with that of water outlets. **Key words:** scoop cooling system, type of water inlets, numerical simulation, wake flow field

涡轮机叶片磨损测量技术试验研究 = **Experimental Study of Measurement Technology to Determine the Wear-and-tear of Turbine Blades** [刊, 汉] / QI Hong-wei, YANG Jia-dong, TIAN Dian-juan, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(3). — 245 ~ 248