

6FA 燃气轮机进气系统流量校准方案分析

薛 晶

(南京汽轮电机(集团)有限责任公司, 南京 210037)

摘 要:本文基于某 6FA 燃气轮机项目进气喷嘴校准装置的设计过程,通过建立进气道模型,选择与安装流量喷嘴、测压耙与扫描阀的方案,说明安装进气流量校准系统的作用与安装校准装置对进气流量喷嘴空气流场的影响,结果可帮助提高燃气轮机进气流量测量精度。

关 键 词:6FA;燃气轮机;压气机;进气;流量喷嘴;扫描阀

中图分类号:TK472 文献标志码:A 文章编号:1009-2889(2018)02-0042-04

实验用燃气轮机进气系统除了为燃气轮机提供温度、压力、流量适当的清洁空气外,也为燃气轮机的压气机流量、压比、效率以及透平热耗的考核提供流量数据。压气机通过进气管道吸入空气进行压缩,在进气管道的前端装有 4 只流量喷嘴,通过测量流量喷嘴前的总压以及喷嘴喉部的 4 个静压点的压力来折算通过喷嘴的空气质量流量,再将 4 个流量喷嘴的流量相加,就可以得到整个进气系统的总流量,这个流量参数作为压气机性能考评的重要参数之一,对其精度有较高的要求。燃气轮机的进气系统过于庞大,流场在不同工况下变化较大,无法使用常规气体流量计进行测量,目前国际主流做法是使用流量喷嘴来测量。这种测量方式一方面因喷嘴的

测量孔加工精度等原因,实际测量计算出的流量与真实流量有一定偏差,另一方面在流量变化较大时可能造成在不同流量段的流量系数偏差。因此需要在正式测试压气机性能之前单独增加一套辅助装置来校正流量喷嘴的测量数值,并在不同的典型工况给出喷嘴相应的校正系数,这样在正式测试过程中通过加入相应的校正系数可以更加准确地测量各工况下的空气流量^[1-6]。

1 进气系统基本结构

如图 1 所示,外界空气经由进气百叶窗、垂直风道、90°弯角、进气过滤网后进入流量喷嘴,再进入

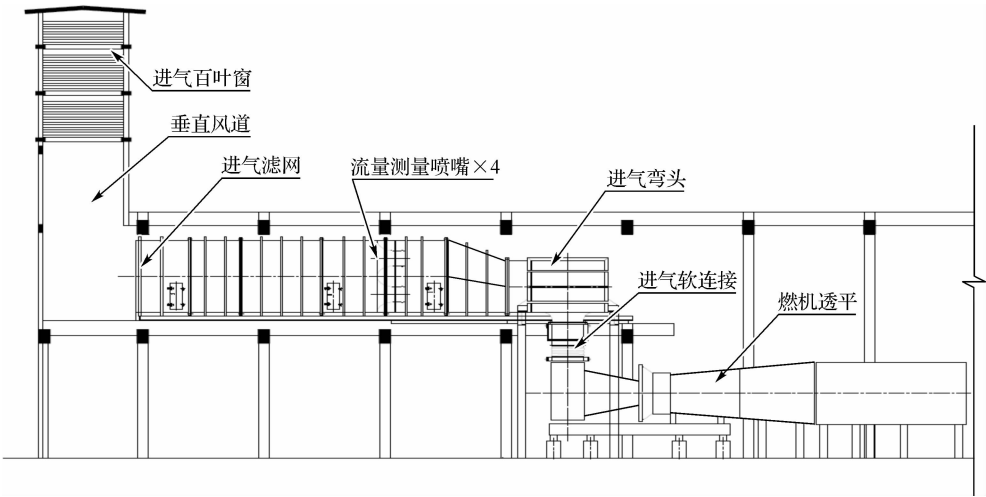


图 1 进气系统的基本结构

初始断面为 3 738 mm×4 038 mm,长约 18m 的矩形收缩流道。顺着流道水平转弯 90°,经过截面 4 300 mm×3 600 mm,长 10 m 的矩形管道后,垂直转弯 90°,最后经由软连接通过水平过渡段与燃气轮机进气室连接,将空气引入燃气轮机。

进气测量装置安装在进气滤网后渐缩段之前,流量喷嘴设计尺寸见图 2,4 个流量喷嘴镶嵌在一个流道横断面钢结构内,整个横断面除 4 个喷嘴通流外其余部分与进气道完全密封。

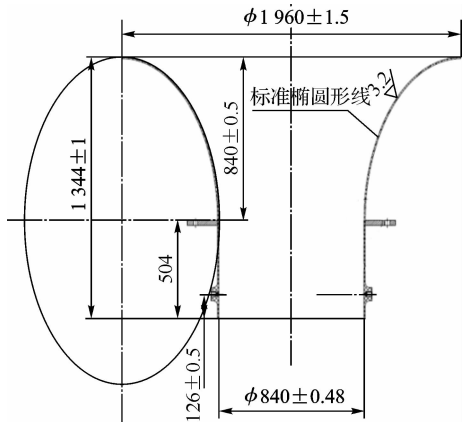


图 2 进气流量喷嘴外形图

2 标定装置

2.1 标定方案

进气系统测量主要工况:在 6FA 燃气轮机压机进气可转导叶达到 90°、转速在 5 230 r/min 满转速工况下,测量 4 个流量喷嘴的实际流量,重复测量 4 次计算此工况下的标定系数,确定实际流量与试车站总压、静压采样点数据之间的关系,便于以后能够通过试车站自身配备的设备测量流量,并考量在不拆卸标定装置的状况下对测量结果的影响。在喷嘴喉道壁圆周上均布了 4 个静压采样点,各点之间有管路互通,取得喉道静压的物理平均值。

2.2 测量设备

2.2.1 电子扫描阀

本次试验采用美国 PSI 公司的 DTC Initium 电子压力扫描阀系统来测量压力,通过扫描阀测量各点的压力值。系统共 5 个模块,每个模块 64 通道。采样频率可大于 1 000 Hz,系统有自动校准功能。

2.2.2 总压耙结构

将圆形喉道截面分为 8 个面积相等的圆环,在每个圆环的中间圆周上均匀布置 8 个总压测点,通过 8×8 共 64 个测点了解喉道截面总压分布情况。

因喷嘴是吸入式的,其流动结构简单,考虑到数据采集模块的总通道数,8×8 的总压耙设计已满足测量要求。同时,在喉道截面圆周壁上均匀布置 4 个静压测点,各点之间有管路互通,取得喉道静压的物理平均值。参见图 3。

为了布置这些测点,根据出口直径设计加工总压耙测压孔的直径为 2 mm。孔口加倒角,降低气流不敏感性,提高总压测量精度。总压耙采用钢结构,局部采用树脂修型,降低气流阻塞度。使模型和连接件器件良好地平滑过渡,降低凹腔和凸起引起的阻塞和干扰。在支臂结和处使用流线型锥头固定,不会因为振动和气流冲击脱落。耙体由均匀分布的 8 个臂和中心整流体构成。每个臂上布置了 8 个总压探针,针尖正对来流。压力管路经耙臂内部穿过喷嘴壁引出。总压耙体阻塞度约 4%,而且采用了尖的前、后缘以减小对流场的干扰。见图 4。

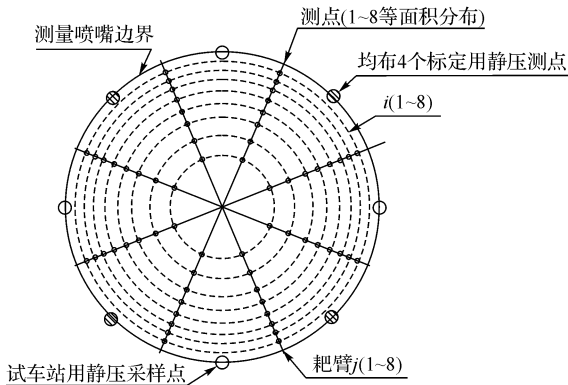


图 3 总压耙分布与静压点布置图

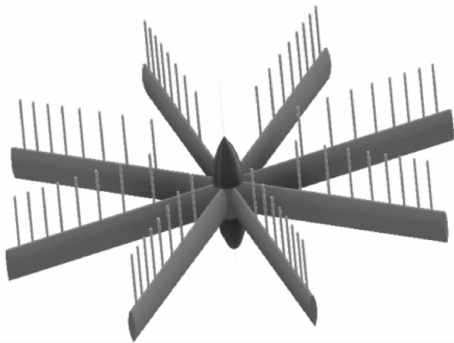


图 4 总压耙 3D 模型

现场安装时发现,玻璃钢结构的喷嘴变形较明显,喉道和出口均呈不规则椭圆状。总压耙同时也起到了支撑加固和修型的作用,安装完毕后,喉道截面呈圆形,直径实测平均值均为 1.223 m。使用时,总压耙编号与喷嘴对应。

扫描阀系统输出文件中的数据是所测压力与环境大气压力的差值,以 psi 为单位。试验时,从耙臂

端部到阀体的导气软管最大长度约 3m,缩短了压力平衡时间;将扫描阀体固定在喷嘴附近墙体上,以尽量避免振动干扰;布置系统控制和传输管线时采取了密封措施,保证了气流只从 4 个喷嘴流过。

2.3 数据处理方法

首先在停机零流量状态下,采集电子扫描阀各通道初读数。按要求,标定是在一次启动后采集 4 次。因此,处理各次采集的数据时,都使用同一个初读数文件。测量值减去初读数,就得到了结果数据。将结果数据换算成以 Pa 为单位的绝对压力数据后,就可以带入计算各喷嘴实际流量。

2.4 流量控制系数

本次标定只在某个特定的工况下测量典型值,得到的系数完全可满足这些测量点的实际要求。

流量控制系数 k 可通过下式计算:

$$k = \frac{Q_m}{Q'} \tag{1}$$

其中 Q_m 为实际质量流量,参考流量 Q' 可通过下式计算:

$$Q' = A_{th} \sqrt{\frac{2(P_0 - \bar{P}) \cdot P_{atm}}{RT_0}} \tag{2}$$

式中: P_0 为来流总压, T_0 为来流温度, $\bar{P}$ 为喉道平均静压, P_{atm} 为大气压, A_{th} 为喉道截面积, R 为气体常数 287 J/(kg · K)。

重复测量的误差按下式计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} \tag{3}$$

式中: σ 为均方根误差, n 为重复次数, x_i 某测点第 i 次测量的数据, $\bar{x}$ 为某测点数据的算术平均值。

经过多次测量以及去除误差,最终得到某额定条件下的流量控制系数 k 。

3 测量设备的影响

进气测量校正主要设备(总压耙)本身安装在进气流量喷嘴中,处于流量喷嘴流道正中心,因此会对通过流量喷嘴的气流造成一定影响,为此对进气流道系统进行了数值分析,包括无测压耙数值计算以及安装有测压耙数值计算。对两者进行了对比,从而为设备运行提供参考。

按照图 5 实际进气道模型建立网格模型并由 Fluent 进行仿真计算^[7-9],进气在喷管处产生高速

气流,其计算对于边界层分布有着严格要求。通常以边界层 y^+ 值来定义。根据计算参数,边界层底层厚度不高于 1 mm。网格参数具体见表 1。

表 1 网格参数

工况	边界底层厚度/mm	层数	增长率	总网格数
无测压耙	1	10	1.05	510 万
有测压耙	1	10	1.05	600 万

计算分为无测压耙和有测压耙两种情况。无测压耙计算结果可以清晰地获得整个压力场不受设备影响的分布状态,可用于指导测压耙安装位置的校验。压力测量设备应安装于压力稳定区域且有足够大的预留空间。

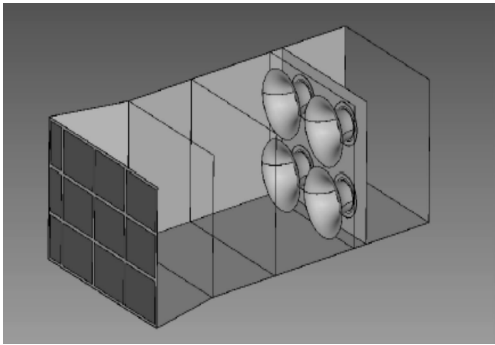


图 5 实际进气道模型

按照项目技术要求,进行仿真计算的环境工况如表 2 所示。

表 2 环境工况

流量/(kg · s ⁻¹)	工作压力/Pa	温度/℃
125.5	101 325	17.3

如图 6 所示,4 个喷嘴内压力分布呈现对称状态,压力高点向中轴偏离,但整体来看压力分布稳定且有规律,适合布置测压耙。从图 7 压力分布俯视图来看,在喷嘴的出口段有足够区域布置压力测量设备。这一区域压力分布稳定且范围很大,能够容许足够的压力波动。

从图 8 有测压耙压力分布正视图可见,测压耙对于压力分布有一定影响。测压耙结构产生压力局部高点。从测压点来看,贴近于中心的测压点压力值不再适合作为流量均值,应采用 2 倍于中心区域直径的外侧测量点的测量值。从对称性来看,各区域的压力值呈对称状态,消除了喷嘴布置位置的影响。

从图 9 有测压耙压力分布俯视图来看,同样反映了这一计算结果。另外由于测压耙设备产生阻力

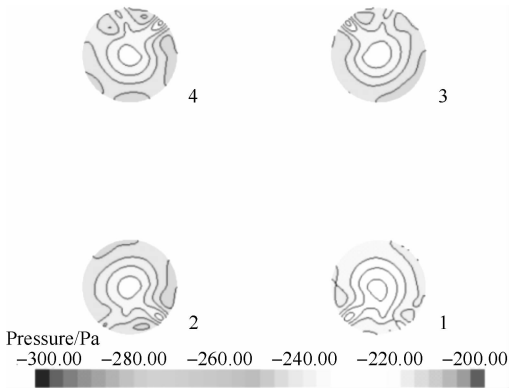


图 6 无测压耙压力分布正视图

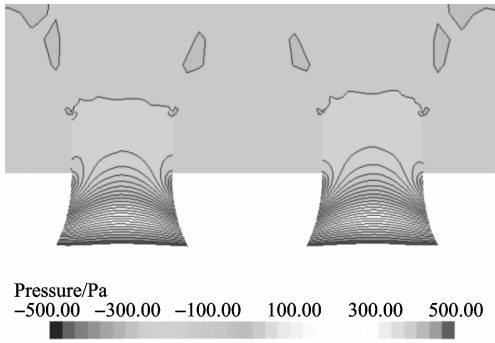


图 7 无测压耙压力分布俯视图

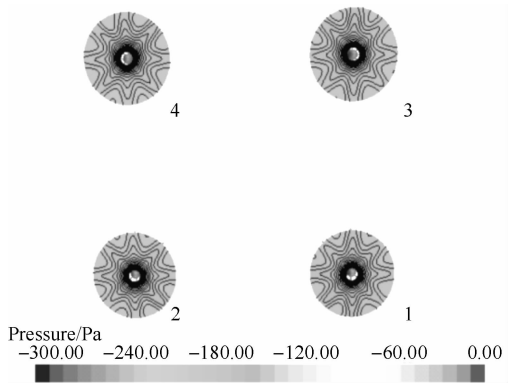


图 8 有测压耙压力分布正视图

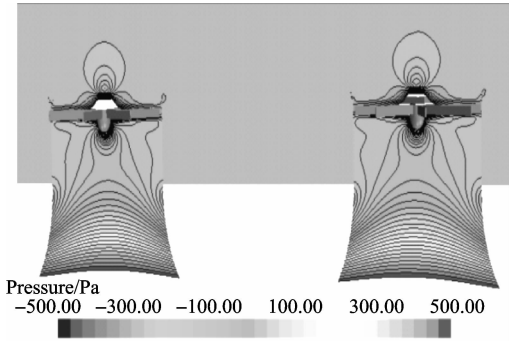


图 9 有测压耙压力分布俯视图

从 CFD 模拟结果来看,可以得到以下几个结论:

- 1) 目前测压耙所安装位置处于合理区域,压力值稳定且区域面积较大。
- 2) 安装测压耙后,喷嘴内压力场受测压耙中心区域影响产生局部压力高点,所以测压点布置应尽量布置在外侧,不应小于 2 倍中心区域直径的范围。
- 3) 安装测压设备后,系统阻力略有增加,其增加值约 50 Pa。

通过以上结论,决定在完成进气流量校正后,不拆除总压耙,只将外围连接软管和扫描阀等拆除,防止因总压耙的存在与否对最终结果造成偏差,同时总压耙也对进气测量有一定的支撑和修型作用。

4 结语

综上所述,燃气轮机进气流量测量使用流量喷嘴测量是比较常用的测量手段,在测量过程中通过对进气流量喷嘴的标定,来修正最终测量结果,使得计算燃气轮机压气机性能的主要参数更加接近真实。在标定的过程中以及标定完成后,需要全面考虑以及计算标定装置本身带来的测量误差,通过 CFD 分析结果和其他结构因素来确定标定总压耙的去留问题。

参考文献:

[1] 姜志军,周珏,聂晓冬,等. ASME 流量喷嘴标定应用及其分析[J]. 中国电力,1999(8):17-19,39.

[2] 陈国伟,常澍平,任连海,等. ASME 流量喷嘴的标定及其分析[J]. 机电设备,2010(6):4-5.

[3] 杨海生,宋子顺. 600MW 等级 ASME 流量喷嘴的校验[J]. 电站系统工程,2006(11):31-32.

[4] 石宝龙. 船用燃气轮机进气流场研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2003.

[5] 陈立德. 燃气轮机进气系统流阻损失计算的方法及误差分析[J]. 燃气涡轮试验与研究,1999(5):37-42.

[6] 代毅. 低速风洞流场数值模拟与优化设计[D]. 上海: 上海交通大学,2013.

[7] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社,2004:114-122.

[8] 韩占忠,王敬,兰小平,等. FLUENT- 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004:285-296.

[9] 江帆,黄鹏. FLUENT 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008:10-15.

(下转第 55 页)

影响,进口段的整体压力比无测压耙略高。

- 1) 保持燃料清洁,天然气必须符合《轻型燃气轮机气体燃料使用技术要求》(HB 7120-94)要求。
- 2) 加强对发动机涡轮出口温度的监控。
- 3) 加强对燃烧室火焰筒内外壁、旋流器、喷嘴及压气机叶片的孔探检查。
- 4) 严格遵守发动机操作规程,遵守发动机各工作状态下对涡轮出口温度和连续工作时间的规定,按规定进行暖机和冷机,防止温度过高、使用时间过长或燃烧室骤冷骤热。

参考文献:

[1] 刘文彬. 基于模块化思想的动态故障树分析方法研究[D]. 南京:南京理工大学,2009:10-30.

[2] 侯凌云,侯晓春. 喷嘴技术手册[M]. 北京:中国石化出版社,2007:66.

[3] 王晓琦. 压力旋流喷嘴设计和实验研究[D]. 北京:中国石油大学,2007:61-66.

[4] 杨洪磊. 双燃料喷嘴设计与燃烧流场数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010:52.

[5] 贺红娟. 双燃料燃烧室燃烧流场数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009:45.

[6] CHINN JOHN,J YULE ANDREW. Computational analysis of swirl atomizer internal flow [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Seoul: Institute for Liquid Atomization and Spray System,1997,

[7] 朱达,周晓宇,潘勇进. 9FA 燃气轮机 DLN2.0 + 燃烧室燃烧异常判断及处理[J]. 电力设备, 2006, 7(10): 26-27.

Research on Fault Tree Analysis of the Uneven Distribution of Turbine Outlet Temperature Field

WU Sen¹, XU Xin²

(1. PLA Navy Engine Professional Military Representative Office in Shenyang Area, Shengyang 110000, China;
2. AVIC Shengyang Engine Design And Research Institute, Shengyang 110015, China)

Abstract: In the process of generation in a power station by the gas turbine system, the temperature distribution of turbine outlet goes wrong. So a fault tree is built, in which this fault is set as top event. Then bottom events in this fault tree are gradually eliminated by design process check, design quality check, inspection hole check and mechanism analysis. In addition, the scatter degree of turbine outlet temperature distribution is compared before and after the solution is implemented. Eventually, the natural gas with excessive water content, which leads to fuel nozzle dirty, is the cause of this fault.

Key words:generator set; gas turbine; fault tree; turbine outlet temperature

+++++
(上接第 45 页)

Analysis of Flow Calibration of 6FA Gas Turbine Intake System

XUE Jing

(Nanjing Turbine and Electric Machinery(Group) Co., Ltd., Nanjing 210037, China)

Abstract: Based on a 6FA gas turbine intake nozzle calibration device design process, the intake port model was established, flow nozzle, pressure rakes and scanning valve programs were selected and installed, which was used to explain the role of installation of intake flow calibration system and installation of calibration device pairs effect of inlet flow nozzle air flow field. It can help to improve gas turbine inlet flow measurement accuracy.

Key words: 6FA; gas turbine; compressor; air inlet;flow nozzle; scanning valve