

燃气轮机排气管的流场研究及改进

张义权 (安徽省全椒柴油机总厂)

吉桂明 (哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔摘要〕 结合某型机组船用化改装任务, 分别对A型及B型机组排气管进行多种方案的模型试验, 分析了排气管出口及气流转弯导流片对其性能的影响。证明了在其结构尺寸配合恰当的情况下, 采用导流片乃为进一步改进其性能的一种行之有效的办法。本文还对排气管运行时其结构可靠性进行了探讨与分析。

关键词 燃气轮机 排气管 流场 试验

船用燃气轮机的发展相当迅速, 而利用先进的航空发动机进行船用化改装则是研制船用燃气轮机的一条重要途径。由于工作条件的不同, 对其结构必须进行修改以至重新设计, 其中动力涡轮及其排气管的设计及试验研究则是航空发动机船用化改装设计工作的重要组成部分之一。

一、问题的描述

动力涡轮排气管是燃气轮机排气系统的重要部件之一, 其设计及试验研究的目的就在于在给定结构尺寸条件下, 使得气流具有较小的总压损失或较高的静压恢复能力, 与此同时, 还必须兼顾其结构可靠性等方面的要求。而对于船用燃气轮机来说, 几方面的矛盾与要求则更加突出。

如图1的动力涡轮排气管, 取进口为2—2截面, 出口为4—4截面, 则排气管气动性能可以用下列参数来表示:

总压损失系数:

$$\xi_0 = (P_2^* - P_4^*) / 0.5\rho V^2$$

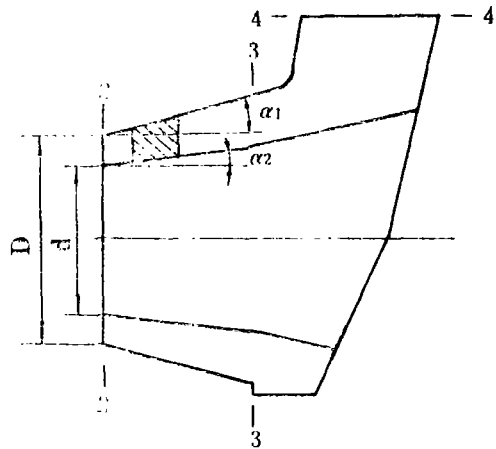


图1 动力涡轮排气管简图

静压恢复系数:

$$\sigma = (P_4 - P_2) / 0.5\rho V^2$$

出口流场气流不均匀度:

$$S_i = (V_4 - V_{4i}) / V_4$$

本文则是用排气管出口截面上各测点的速度 V_{4i} 与平均速度 V_4 之比来表示其流场均匀性的, 并以 $0 \leq V_{4i} / V_4 \leq 1.5$ 来划分整个排气管的出口流场。

在进行排气管的模型试验研究时，一般都认为出口气流背压 P_4 基本不变且等于大气压，即 $P_4 = P_{atm}$ ，则气流在动力涡轮及排气管内的流动过程可由图 2 来表示。从中可以看出，在排气管出口气流背压 P_4 不变的情况下，随着其气动性能的改进，动力涡轮出口气流的压力 P_2 可以不断下降，从而使气流在动力涡轮内的可用滞止焓降增大，输出功率增加，燃气轮机的经济性能得到逐步改善。

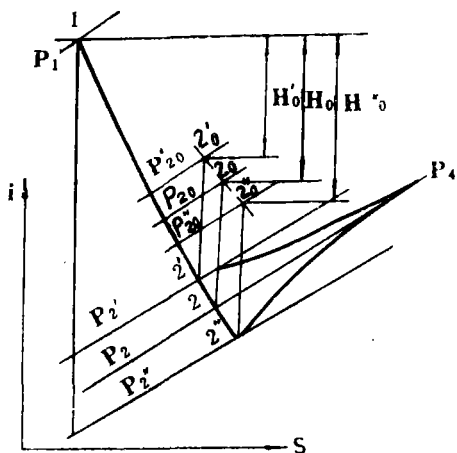


图 2 气流在动力涡轮及排气管中的热力学过程

- 1—2—动力涡轮的膨胀过程
- 2—4—排气管内的流动过程

二、试验设备及试验方案

模型吹风试验是在船舶锅炉涡轮机研究所的进、排气试验台上完成的。试验台的主体部分是一个吹吸两用的低速风洞，出口段直径为 300 mm。

图3、4分别为本文试验用的A型和B型涡轮排气管模型的结构简图。在此基础上，在排气管内部不同位置安装导流片即得到几种不同的改进方案，即A—II, III, IV, V及B—II, III, IV, V等，其中A—V和B—V型结构简图分别见图5、6。

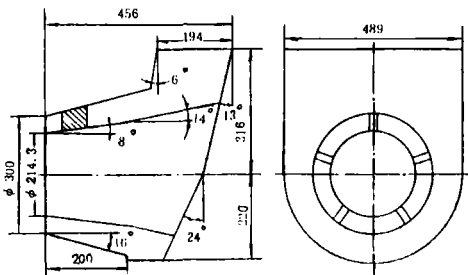


图 3 A型排气管原始方案结构简图

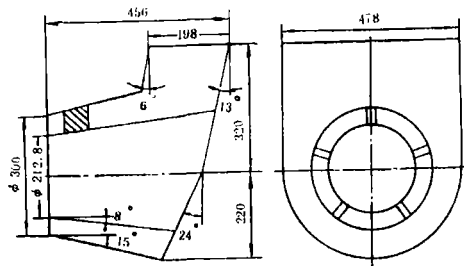


图 4 B型排气管原始方案结构简图

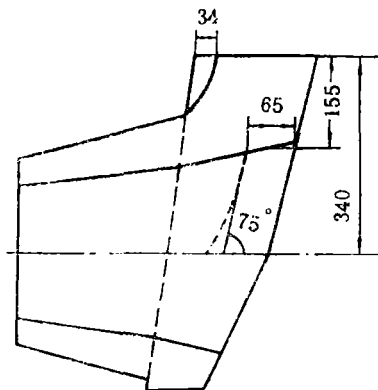


图 5 A—V型排气管改进方案

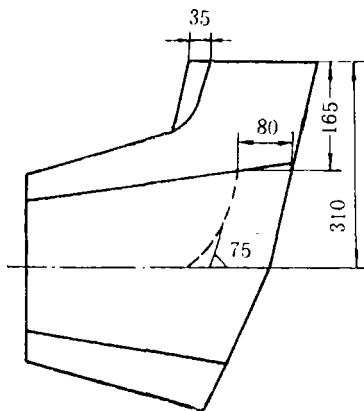


图 6 B—V型排气管改进方案

三、试验测试结果及其讨论与分析

1. 试验测量结果

在进行具体的模型试验时,用总压、静压及方向探针在 $M = 0.3$ 、 $Re \geq 2.4 \times 10^5$ 条件下测出排气管进、出口气流总压、静压及气流方向。气流速度大小则根据 $\rho V^2/2 = P^* - P$ 的关系式得出。测量时,由于进口气流的

均匀对称性,取四个等环面,每个等环面上对称分布4个测点,而在排气管的出口截面上同样按均布的原则来确定测点位置,即沿排气管的轴向分布16个测点,垂直于轴向则分布40个测点,最后根据每一点的测量结果,按面积平均的方法即可以得到排气管进、出口截面上各气流参数的平均值。表1、2即为A型和B型各方案的模型吹风试验结果。

表 1 A型动力涡轮排气管试验结果

| 序号 | 试验方案 | 试 验 结 果 | | | | | |
|----|-------|---------|----------|---------|------------------------|----------|-----------|
| | | P_2^* | P_2 | P_4^* | $\frac{1}{2} \rho V^2$ | σ | ζ_0 |
| 1 | A-I | 424 | -201.75 | 88.45 | 625.75 | 0.322 | 0.536 |
| 2 | A-II | 432 | -189.1 | 119.7 | 621.1 | 0.304 | 0.503 |
| 3 | A-III | 414.125 | -206.875 | 91.3 | 621 | 0.333 | 0.519 |
| 4 | A-IV | 471.625 | -137.25 | 126.15 | 608.875 | 0.225 | 0.56 |
| 5 | A-V | 432.5 | -190.625 | 128.5 | 623.125 | 0.305 | 0.49 |

表 2 B型动力涡轮排气管试验结果

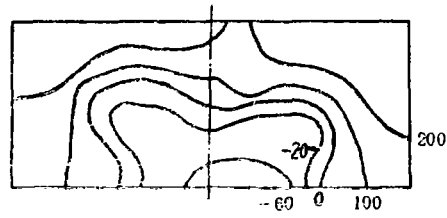
| 序号 | 试验方案 | 试 验 结 果 | | | | | |
|----|-------|---------|----------|---------|------------------------|----------|-----------|
| | | P_2^* | P_2 | P_4^* | $\frac{1}{2} \rho V^2$ | σ | ζ_0 |
| 1 | B-I | 462.375 | -135.4 | 49.1 | 597.775 | 0.226 | 0.691 |
| 2 | B-II | 432.8 | -131 | 68.4 | 513.8 | 0.232 | 0.646 |
| 3 | B-III | 421.625 | -135.875 | 97.6 | 557.5 | 0.244 | 0.58 |
| 4 | B-IV | 437.625 | -47.25 | 87.35 | 487.875 | 0.1 | 0.722 |
| 5 | B-V | 439.25 | -138.625 | 125.2 | 557.875 | 0.24 | 0.543 |

2. 试验结果的讨论与分析

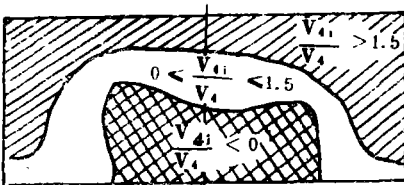
从表1、2和图7~10中可以看出:对方案I进行吹风试验时,排气管出口流场中均存在一旋涡回流区,即大部分气流集中由左、右两侧及后侧壁附近以较高流速排出,而在靠近前壁的轴线附近,气流速度相对较小,甚至会出现气流倒流的现象,从而形成一旋涡回流区。此旋涡回流区的存在使得出口流场内的气流分布趋于不均匀,从而在很大程度上直接影响了排气管的气动性能。

方案II在排气管出口处前侧壁内安装一出口导流片,结果使得排气管出口流场中旋涡回流区有所减小,压力及速度分布也较方案I趋于均匀一些。而在排气管内安置气流转向导流片的方案III,同样也可以使排气管出口流场内的气流分布趋于均匀。由此可见,无论是A型还是B型的动力涡轮排气管,安装出口导流片及气流转向导流片都可以有效地改进其气动性能。

方案IV、V均是在排气管内同时安装有

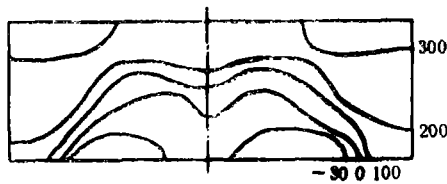


(a) 总压分布

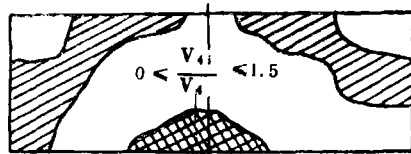


(b) 速度分布

图7 A—I方案试验结果

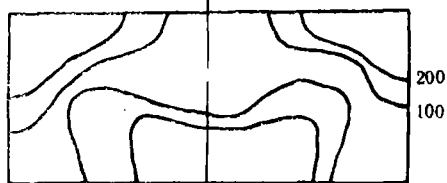


(a) 总压分布

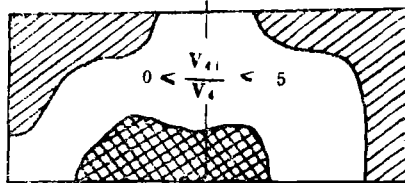


(b) 速度分布

图8 A—V方案试验结果

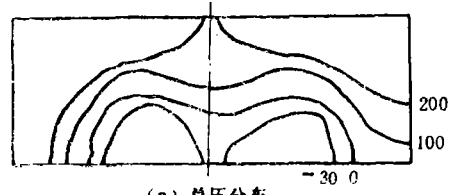


(a) 总压分布

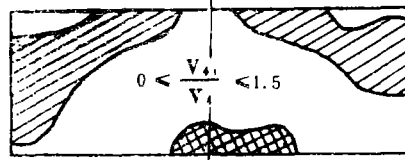


(b) 速度分布

图9 B—I方案试验结果



(a) 总压分布



(b) 速度分布

图10 B—V方案试验结果

出口及气流转向导流片，不同之处在于排气管内气流转向导流片位置的不同，即方案IV中的导流片位置靠前一点，而且离排气管出口截面又较近。两个方案的试验结果完全相反，方案IV排气管的气动性能非但没能得到改进，反而更趋恶化，其压力损失系数分别由方案I的0.536和0.691增加到0.56和0.772，而且出口流场中的气流分布也较方案I、II、III不均匀，甚至在试验过程中，导流片的前端还会经常出现裂纹。然而，一般的理论分析认为，在排气管的出口及气流转弯处设置导流片应该可以使气流分布趋于合理并减小流动过程的压力损失，从而改进排气管的气动性能。方案V的试验结果与此分析情况完全相符，排气管出口流场中的旋涡回流区相应减小，气动性能在几种方案中为最佳，总压损失系数 ζ_0 分别为0.49和0.54，即比方案I分别降低了9.2%和23%左右。

由此可以看出，在排气管内适当位置安装导流片，可使流动趋于合理，从而减小流动过程的压力损失，出口导流片则可以有效地减小出口流场内的旋涡回流区。两种导流片合理匹配则可以使排气管的气动性能得到明显改进。反之，气流转向导流片的位置不当，导流片对气流的转弯非但不能起引导作用，反而使流动过程的摩擦损失大大增加，

而且还会引起气流脉动,使导流片及排气管的振动加剧,影响其结构可靠性。因此,在排气管内采用安装导流片的方法来改进其气动性能时,对于气流转向导流片位置的确定尤其要慎重对待。

四、导流片实际应用中的技术问题讨论

如前所述,动力涡轮排气管的设计会在一定程度上影响到燃气轮机的经济性及结构可靠性,然而,排气管在实际运行与模型试验时工作条件存在很大差异。模型吹风时,由风洞来的气流是均匀的轴向气流,而实际运行时,由于受动力涡轮高速旋转及其离心力的影响,使得排气管进口气流既有旋转,又存在着一定的速度梯度。不仅如此,进口气流的不同还会导致排气管内气流分布及出口流场的更大差异。经验表明,在排气管实际运行过程中,不均匀的进气条件可能引起气流脉动,使流动损失增加,影响其气动性能,而气流脉动、热膨胀以及应力集中、振动等因素还会直接影响其结构可靠性。因此,要使导流片在排气管的工程设计中得到实际应用,首先必须解决在其运行过程中可能出现的各种问题。

在实际运行过程中,如北京重型电机厂某型燃气轮机在南阳油田的早期运行过程中,就曾出现过导流片脱落的故障。分析其原因,主要是由于导流片通常是直接焊接在排气管内壁上的。实际运行时,这种结构没有吸收热膨胀的能力,且由于材料厚度不同和温差易形成的热应力分布不均以及气流脉动等因素的影响,而加剧了导流片及排气管的振动,使得排气管实际运行时的结构可靠性降低,而难以长期正常工作。

由此可见,排气管及导流片的结构可靠性主要是受应力集中、热膨胀以及气流脉动而引起的振动等因素的影响,而采用直接焊

接结构的导流片又无法消除这些因素的影响。如果导流片与排气管壁之间改用螺钉联接,就可以用其孔径的大小来解决导流片的受热膨胀等问题。船舶锅炉涡轮机研究所研制的MGT-1、MGT-7等燃气轮机也曾出现过类似问题,导流片改用上述结构之后,则顺利通过了150小时运行的试验验收。实践证明,采用螺钉联接的方法是使导流片得到实际应用并确保排气管实际运行时结构可靠性的有效途径。

综上所述,在进行排气管的工程设计研究时,必须以系统工程的观点来综合权衡各方面的影响因素,即着眼于改进其气动性能的同时,还要重视结构可靠性等问题,否则必然会事倍功半,导致不良的后果。

五、结 论

综合所进行的有关船用燃气轮机动力涡轮排气管的流场分析研究工作,可以得出如下结论:

1. 通过一系列的模型吹风试验可知,排气管出口导流片可以有效地减少出口流场中的旋涡回流区,而气流转向导流片对排气管内的气流分布及其气动性能的影响作用更大,位置不当甚至会起到相反的作用;两种导流片相互匹配并共同作用则可以明显改进排气管内的气流分布情况及其气动性能。

2. 采取在排气管内适当位置安装出口及气流转向导流片的方法使得A、B型燃气轮机排气管的气动性能得到明显改进。损失系数分别由0.536和0.691下降为0.49和0.54。

3. 在总结和分析排气管实际运行结果之后,考虑到热膨胀、气流脉动、应力集中以及振动等因素的影响,指出导流片与排气管之间可以采用螺钉联接并用其孔径的大小来吸收热膨胀,以增加排气管实际运行时的结构可靠性。

总之,在排气管内安装导流片乃为进一步改进其气动性能的有效途径,然而在工程设计应用中如何确定其最佳位置,本文对此只进行了初步的探讨,有关这一方面的研究工作还有待于今后进一步深入进行。

参 考 文 献

Захаров А. М. Воздухоприемные и газавыпускные устройства быстроходных газотурбинных судов. Изд. Судостроение, 1977

The Study and Refinement of Gas Turbine Exhaust Volute Flow Field

Zhang Yiquan

(Quanjiao Diesel Works in Anhui Province)

Ji Gujmjng

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

Abstract

The model tests of a multitude of exhaust volute versions for gas turbine unit type A and type B were conducted in connection with a gas turbine marinization effort. The effect of exhaust volute outlet and flow deflectors on the engine performance was analysed. It can be shown that under the condition of a proper matching with the engine structural dimensions the use of the flow deflectors constitutes an effective method for improving engine performance. An investigation and analysis of the exhaust volute structural reliability during its operation has also been performed.

Key Words: gas turbine, exhaust volute, flow field, testing

新 产 品、新 技 术 信 息

R90—1 DG—10.3/39—1型硫酸余热锅炉 是硫酸工业先进而实用的节能设备,“具有国内同类炉型的先进水平”。**主要技术参数:** 蒸发量10.5 t/h; 过热蒸汽压力 3.82 MPa; 蒸汽温度450℃; 给水温度104℃; 热回收率 56.65% (设计值)。特点: 全自然循环、W形烟道、膜式水冷壁、双层护板、自制冷凝水喷水减温; 性能稳定、负荷适应性强、操作简便; 成功地解决了磨损和腐蚀问题; 制造质量好, 运行安全可靠; 密封与保温良好, 余热回收率高(实际平均达 63.9%)。从 1980 年至今, 已为全国各化工厂、磷肥厂提供了 5, 5.5, 8, 10.5, 12, 12.5 和 14 t/h 的硫酸余热锅炉 28 台, 其中 22 台已投运。资中银山磷肥厂 10.5 t/h 炉, 1986 年年增收 53.74 万元。

承接设计, 产品销售服务。

(需要者与编辑部联系)