

# MGT-1型燃气轮机陆上同机并车台 进气装置试验中的若干问题

钱振岳 鄂扬杰

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔提要〕 进气装置在陆上并车试验台上经不同方案的试验,获得了一些鉴定性资料。本文就不同的进气窗对速度场,全压损失的变化,不同的汽水分离器的分离效果,装置的消音效果等问题进行了整理和分析,取得的结果可供燃气轮机船用参考。

主题词 燃气轮机 进气装置 台架试验

## 前 言

MGT-1型燃气轮机同机并车动力装置的进气装置是按船用要求设计的。由于缺乏经验,所以在实船使用前先在并车台上进行试验,目的是在陆上对其性能进行初步鉴定,并为必要的修改提供资料。

燃气轮机的特点之一就是进气量较大,同时压气机对吸入的气流又有所要求,因此,在舰船上设置了专门的进气装置。该装置要满足:

1. 燃气轮机进口气流的速度场相当均匀;
2. 除水、防尘和防冰的性能良好;
3. 进气全压损失最小;
4. 进口噪音最小;
5. 结构简单工艺性好,重量尺寸小等。

船用燃气轮机的性能和寿命与进气装置性能的好坏密切相关。因此作为动力装置的设计单位应对进气装置的性能提出恰如其份的要求。但要做好这一点,尚待进一步收集资料 and 从样机的模拟试验,以及从船用进气装置的实船试验和应用中积累经验。

## 一、进口速度场

按要求在陆上试验的进气装置应尽可能与舰船上的结构布置和工作条件一致或接近,这样陆上试验的结果才有通用性。

陆上试验的进气装置其结构与船用的相同。船上进气口布置在甲板上,陆上布置在同一

室内，方位如图1所示。

这种布置是考虑了舰船在航行时进气道的进口背向前进方向，避免大量海水进入进气道。

文献[1]中列出了进气装置结构设计要求为：

1. 进气竖井深度 $H/D \geq 5$ 时压气机进口速度分布就不受进气装置甲板上面部分形状的影响。只决定于与压气机相连的竖井下部结构元件。

2. 为使压气机进口速度场均匀及全压损失最小，在 $H/D$ 满足一定值后，最佳相对长度 $(L/D)$ 与 $B/D$ 间的关系见图2。

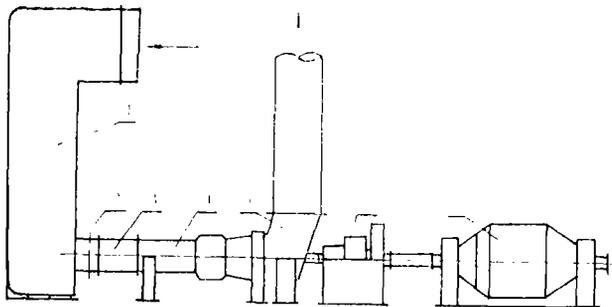


图 1 MGT-1型燃气轮机陆上并车动力装置示意图

- 1. 进气装置 2. 机进口测量处 3. 稳流段
- 4. 发动机（二台）5. 排气管 6. 并车齿轮
- 7. 水力测功器

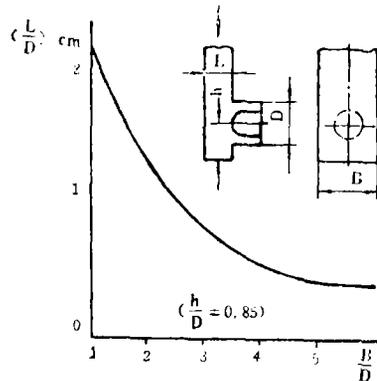


图 2 竖井最佳相对尺寸

3. 对于空气流量大于 $50\text{kg/s}$ ，压气机进口速度为 $130\sim 150\text{m/s}$ 的燃气轮机，进气装置入口气流速度不大于 $15\sim 18\text{m/s}$ ，竖井内流速为 $20\sim 30\text{m/s}$ 。

该进气装置的有关尺寸按图3可以得出： $H/D=5.87$ ； $h/D=1.06$ ； $B/D=2.5$ ； $L/D=2.06$ 。而当 $B/D=2.5$ 时，从图2上可以查得 $L/D=1.0$ ，可见该进气装置设计是满足文献[1]规定的要求的。为了验证设计，曾对带三级过滤器的进气装置的速度场进行了测量。

试验装置和测量系统简述如下：

在进气口的正面和侧面安装了三级过滤器，其面积分别为 $2.656\text{m}^2$ 和 $1.826\text{m}^2$ 。测量系统如图4所示。在测量截面上沿周均布了四支全静压复合探针，每支沿径按对数—线性法分布。在温度测量截面上均布了四支全温探针，每支沿径五点按等环面分布。

并车与单机试验表明，速度场都是一样的，重复性良好。

把并车试验中右机在1.0工况时测量截面上的全压，静压和速度分布画成图5，从图上可以看出：

- 1. 在垂直的直径上全压自上而下增加，即靠近上壁损失最大。这是由于上端气流转的曲率较大，有少量脱流存在所致。
- 2. 在水平直径上，右机的左侧和左机的右侧全压损失较大，即水平方向上压力损失不对称。
- 3. 据文献[1]介绍，速度场不均匀度 $\delta$ ，由下式评定

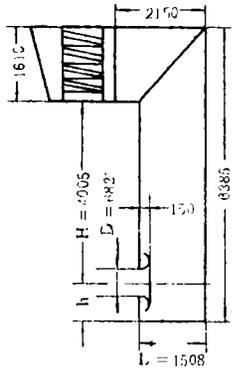


图 3 进气装置结构示意图

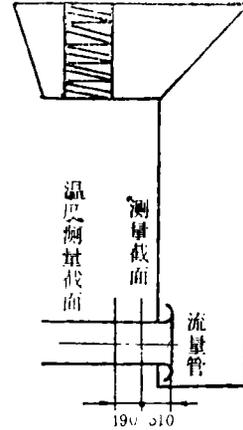
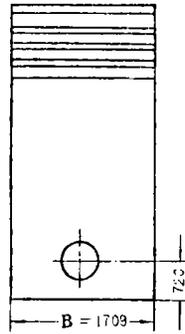


图 4 测量系统示意图

$$\delta_i = \frac{W_i - W}{W} \quad \delta_{cp} = \frac{1}{F} \int_F |\delta_i| dF$$

式中： $W_i$ 、 $W$ 分别为当地速度和截面上的流量平均速度。 $F$ ：截面积。

大部分现代船用燃气轮机喘振裕度为8~12%，最大局部不均匀度 $\delta_{max}$ 值在<5%面积上允许达10~15%，面积平均不均匀度 $\delta_{cp}$ 不超过4~5%。

该机测量截面上速度分布见图6。

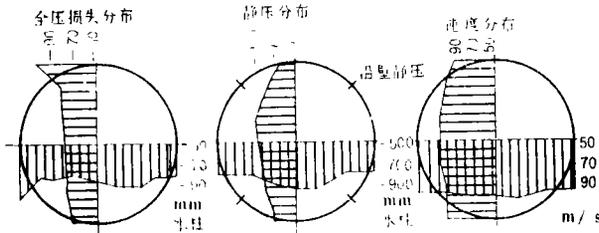


图 5 右机1.0工况全压静压速度分布

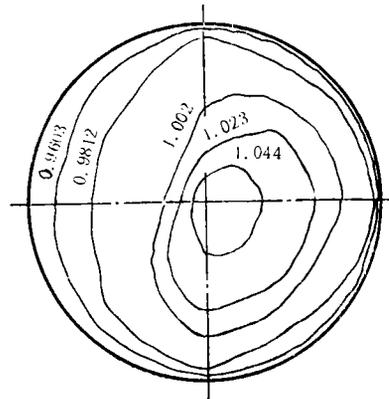


图 6 右机1.0工况速度分布图 ( $W/\bar{W}$ )

按图6算得表1上的 $\delta_i$ 及 $\delta_{cp}$ 。

表 1

$\delta_i$ %	0.5	1.25	2.93	3.35	4.4	7.7
$\Delta F$ %	39.1	14.9	18.4	14.4	4.47	8.73
$\delta_{cp}$ %	2.27					

试验结果表明：

二侧进气装置的速度场， $\delta_{cp} < 4 \sim 5\%$ ， $\delta_{max} < 10 \sim 15\%$ ，均符合文献[1]的要求。

为了进一步说明本装置的性能，在这里引用[1]里的试验结果见图7。

这个试验是在模型上比较了同一个竖井两种进气窗布置时的气动特性。一是侧向和侧向两个进气窗，二是只有一个侧向布置的面积和前者相等的进气窗。

结果表明：单面进气的全压损失、阻力系数和速度场均比两面进气优越。可以估计该机

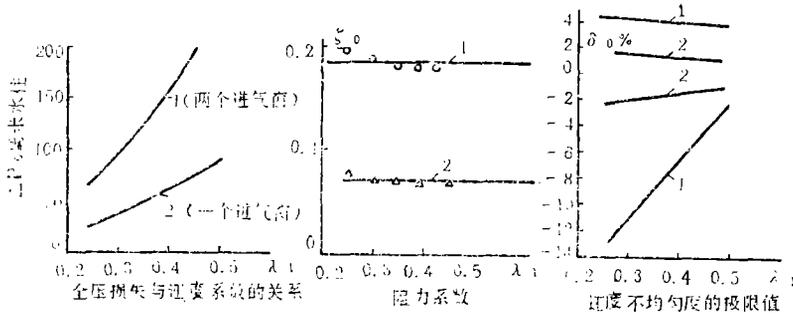


图 7 一个与二个进气窗装置特性对比

单面进气亦会有类似的结果，但进气口的迎风面积比两面进气要大。

## 二、进气阻力损失

进气装置的阻力损失是由水气分离器损失和进气道损失两部分组成。由于该机进气装置试验中只测定了装置的总损失，所以这里各部分的损失只能根据文献[1]、[6]上的有关结果和推荐的公式来进行计算。

试验分别对同一进气道配合两种过滤器作了阻力损失的测定。测试结果见表2。

表 2

名称与算式	工况 单位	三级过滤				网垫式			
		0.5	0.7	0.8	1.0	0.5	0.7	0.8	1.0
空气流量 $G_0$	kg/s	33.7	35.3	35.9	37.2	31.68	32.35	35.17	36.2
进气压力 $P_0$	kPa	103.2				101.2			
进气温度 $T^0$	k	282	281	282	282	301	303	305	304
进气比重 $\gamma_0$	kg/m <sup>3</sup>	1.275	1.279	1.275	1.275	1.171	1.163	1.156	1.159
进气速度 $C = G_0 / \gamma_0 F^*$	m/s	5.89	6.16	6.28	6.5	4.136	4.384	4.651	4.775
阻力损失 $\Delta P$	kPa	0.57	0.69	0.77	0.84	1.01	1.11	1.18	1.3
过滤器损失 $\Delta P_1 = 1.26 C^2 \cdot 0.6$	kPa	0.48	0.52	0.54	0.59				
进气道损失 $\Delta P_2 = \Delta P - \Delta P_1$	kPa	0.09	0.16	0.23	0.25				
进气道损失 $\Delta P_2' = 0.4 \times \Delta P_2^{**}$	kPa					0.039	0.068	0.093	0.098
网垫损失 $\Delta P_1' = \Delta P - \Delta P_2'$	kPa					0.98	1.04	1.09	1.2

\*  $F = 4.482m^2$  (三级过滤进口面积),  $F = 2.656m^2$  (网垫式进口面积)  $F = 6.5412m^2$  (网垫式气流过网面积)。

\*\* 文献[1]中得出：“一个进气窗的竖井中全压损失为两个窗的40%”。

通过这些试验可以看到：

1. 不管网垫式还是三级过滤器式进气装置，在进气阻力损失上均能符合该机供货技术要求。由此可见国际上常见的996Pa（4英寸水柱）的进气阻力损失经过努力还是可以实现。

2. 进气装置阻力损失的大部分是由进气过滤器产生的，进气道只占一小部分。因此，

少阻力的着眼点必须放在过滤器上。

### 三、消 音

该机进气道在竖井壁面上都贴有 $\delta = 25, 50\text{mm}$ 泡沫塑料, 并有两个 $90^\circ$ 转折。试验时曾对两种过滤器都在进气口附近测量了噪声值。测量仪器系采用丹麦BK公司的2203精密声级计, 1613倍频程滤波器, 4044电话筒和VA0039软管。测点布置如图8所示。

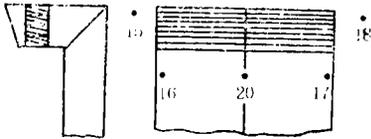


图 8 噪音测点布置

三级过滤器试验时测点是 15\*, 16\*, 17\*, 18\*。网垫式过滤器试验时只测了20\*点。各测点距进气口壁面为米。测试结果见表3, 从中可以看出:

表 3

工 况	测点 单位	15	16	17	18	20
		0.5	L dB A dB	102 99	102 98	102 98
0.8	L dB A dB	105 101	106 99	105 100	104 101	104 100
1.0	L dB A dB	105 101	106 99	105 100	104 101	

1. 同一进气道不同过滤器消音效果相近。进气口处噪音为100dB (A声级) 左右。

2. 由于没有测量压气机进口噪音, 因此进气道本身消音效果不能直接评定。考虑到与本机参数相近的MGT—4, MGT—7机压气机进口噪音130dB 左右, 故可间接估计该进气道能消音30dB左右。

### 四、进气过滤

进气装置除水性能好坏对船用燃气轮机是头等重要的, 所以专门设计与制造了两种结构过滤器: 网垫式的和三级过滤式的。想通过陆上并车时的除水试验来总结经验, 改进设计和确定方案。

#### 1. 网垫式过滤器

织网用0.45mm直径尼龙丝, 网垫层数80, 网垫厚度60mm。每块网垫面积 $790 \times 690\text{mm}$ , 共24块, 斜置。这种网垫据国外资料介绍, 过网速度 $\leq 6\text{m/s}$ 时, 直径在 $3\mu$ 以上的水滴过滤效率在95%以上。

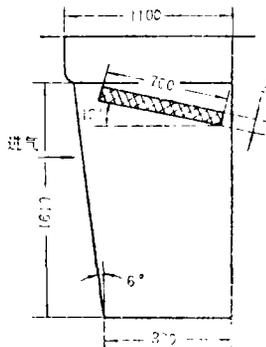


图 9 网垫式过滤器结构示意图

### 2. 三级过滤器

第一、三级都是惯性分离级，两者结构相同，由1mm钢板焊制而成。其对于 $>10\mu$ 水滴分离效果较好。第二级为网垫层，网丝直径为0.3mm，垫厚10mm。它使直径 $<10\mu$ 的水滴凝聚成大水滴，由过滤器下部流出。第三级除了分离剩余的水份外，还有为空气导向的作用。

这种过滤器推荐用于空气流速 $<8.5\text{m/s}$ ，大于 $9\text{m/s}$ 时过滤效果急剧下降。至于除盐效率即使在风速达到30节条件下氯化钠含量将不超过 $0.01\text{P.P.M.}$ 。

由于我国尚未制定进气装置的除水标准，又缺少除水后气流中颗粒物含水量的精确测量手段。所以本试验是一般工艺性试验，只能评定一下过滤器的除水效率。试验装置和测试系统如图11所示。

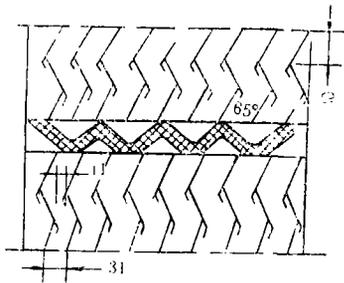


图 10 三级过滤器结构示意图

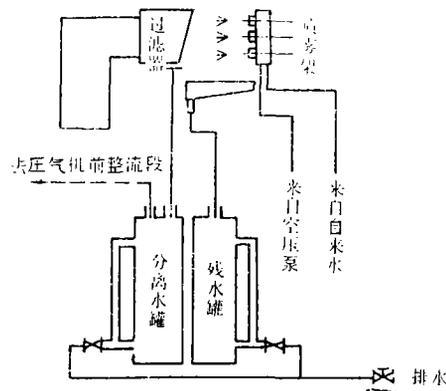


图 11 除水试验系统布置图

本试验用PQ—2型喷漆枪制雾，水压为 $0.44\text{kPa}$ 左右。

网垫式过滤器除水试验是在发动机 $0.5\sim 0.8$ 工况下进行的。

喷水量变化范围为  $5.5\sim 28\text{kg/min}$ 。由于集水槽泄水不畅，喷水大量进入进气道。三级过滤器试验时接受了网垫式试验经验，在分离水罐上部用一根 $\phi 10$ 的管子与压气机整流段连通，使水罐内形成负压，从而解决了泄水难的问题。但由于集水孔开在气道壁上，仍有一部分水被气流带入进气道，所以除水效率还是较低。

综上所述尽管资料上介绍网垫式过滤器的除水效率均很高，但若过滤器的制造质量和集水、泄水系统不善，还会使装置的除水效率大大下降。

最近上海交大研制成功 $A_2*3-B, 3*-A_2*$ 型进气汽水分离器。其结构形式类似英国三级过滤器，而性能却优于前者，流经分离器空气流速为 $10\text{m/s}$ ，其进出口总压损失仅有 $0.26\text{kPa}$ （27毫米水柱），分离系数为99.9%，除水能力 $6.77\text{kg/m}^2\text{s}$ ，分离后的含盐量 $<0.01\text{P.P.M.}$ 。并用激光器精确测定各项数据。这种分离器若结合良好的集水、泄水系统，则该装置的整个性能即可大为改观。

## 五、结 束 语

船用燃气轮机进气装置的设计是一个综合性的问题。它要兼顾速度场均匀，阻力小，过

（下转38页）

表明，对于脆性断裂用Goodman关系式能得出相当精确的结果，假定金属全面屈服破坏沿CD线发生，通常兼用CD与Goodman曲线，也即认为OCEB为“安全区”。用此式进行校核：

定位螺钉材料为40CrNiMoA

$$\text{其 } \sigma_b = 9.807 \times 10^{-2} \text{MN/m}^2$$

$$\sigma_s = 8.34 \times 10^{-2} \text{MN/m}^2$$

$$\sigma_{-1} = 3.92 \times 10^{-2} \text{MN/m}^2$$

用 $\sigma_m = 1.01 \times 10^{-2} \text{MN/m}^2$ 代入计算得到允许的最大交变应力幅为 $\sigma_a' = 3.52 \times 10^{-2} \text{MN/m}^2$ ，而实际应力幅值达 $4.24 \text{MN/m}^2$ ，大于允许值，故零件必然发生断裂事故。

### 三、措施及结论

1. 零部件设计中尽量避免应力集中现象，在其它大部件不予变动的前提下，将定位螺钉加长，取消螺钉光杆端部的退刀槽，改为如图1中II所示的连接方式。

2. 动力涡轮转子单独动平衡后，装上联轴器的外齿圈再一起进行动平衡。其精度要求仍为 $6g \cdot \text{cm}$ 。

经试验考核表明，分析是正确的，措施是有效的，有一台机组已经过了500小时的长试，未出现任何故障。发生故障的一台机组，采取上述措施修复后，已经过90余小时的试验，状况良好，在60小时台架试验结束后，分解检查了各有关零部件，有的作了探伤检验，均为正常。

通过故障的排除和分析，对于动力涡轮静子部分的承载及强度校准有了新认识，需要对某些构件考虑疲劳强度的校核，也有助于对过去几型机组相同部位出现的不同形式故障的分析。

### 参 考 文 献

- [1] (日) 涩美光、铃木幸三、三田贤次等. 材料力学. 人民教育出版社, 1982年
- [2] 铁木辛柯. 材料力学. 科学出版社, 1979年
- [3] (美) 博雷西AP, 赛德博坦OM, 西利FB, 史密斯JO著, 汪麟、汪骏译. 高等材料力学. 科学出版社, 1987年
- [4] (苏) 皮萨连科P. e, 亚科符列夫A. II, 马特继也夫BB著, 范钦珊、朱祖成译. 材料力学手册. 中国建筑工业出版社, 1981年

(上接46页)

滤性能好，消音，结构简单，工艺性好和重量轻。其中良好的过滤性能和均匀的速度场是主要的两项指标，必给予足够的重视。

为了设计出符合要求的进气装置，需要在结构设计，模型与实船试验和测试方法等方面继续努力。由于试验条件所限，目前的资料尚不系统，文中的认识只是初步的带局限性的，还有待进一步地工作。

### 参 考 文 献

- [1] 船用燃气轮机进排气装置. 舰船透平锅炉, 1976, (2-3)
- [2] 船用燃气轮机的进气过滤系统. 国外舰船技术——透平锅炉类, 1979, (5)

used for the reconstruction and design of the transmission system.

*Key words:* variable transmission drive, energy-saving, electromagnetic clutch, design improvement

**4. Research and design of a lignite-firing reciprocating grate furnaces**  
..... *Wang Yongdong* (21)

*Abstract*

In order to open up a new realm for the utilization of lignite, the author has designed a double drum, natural circulation water-tube boiler with economizer, air preheater and transversely positioned reciprocating grate bars. With a thermal efficiency of the boiler as high as 76.80%, significant social and economic benefits can be attained.

*Key words:* boiler, design

**5. The design of a gas turbine waste heat boiler**..... *Wu Yishan* (25)

**6. The off—design performance of two shaft gas turbines**  
..... *Zhao Shihang Hu Ziqin*  
*Xiang Wenguo Zhang Yingjian* (29)

*Abstract*

In this paper the performance maps of 2/LL and 2/HH two shaft gas turbine series are obtained by way of calculating the off-design performance. On this basis, the off-design performance of these gas turbines is analyzed. In conclusion, the paper pointed out that some types of these gas turbines might have potential for development in and application to combined cycle power stations.

*Key Words:* gas turbines, properties, thermodynamic cycle, analysis

**7. Elimination of the connecting screw failure of the power turbine load-bearing casing and load-bearing analysis**..... *Wang Gouhua* (34)

*Abstract*

In connection with the analysis and elimination of a gas turbine power turbine joint screw head failure, the author suggests that some structural parts in the engine should be given a checkout with respect to their fatigue strength. She also stresses the importance of the dynamic balance of the rotor as a whole.

*Key words:* turbine fastener, rupture, analysis

**8. Introduction of Ingersoll-Rand Compad and its Products**  
..... *Guan Huaming* (39)

**9. Some problems concerning air intake tests of the MGT-1 gas turbine land-based parallel running test rig**..... *Qian Zhenyue* (41)

*Abstract*

Some appraisal data were obtained from tests of various versions of intake ducts on a land-based parallel running test rig. This paper sorts out and analyzes a variety of problems, such as the effect of different air intake louver arrange-

