

美国的舰用（陆用）燃气轮机试车台

邬扬杰

关键词 燃气轮机 试车台 美国

1985年9月23日至10月13日，由中船总第九设计院丁振芳（任组长），梁恒萃，邵国华和第七研究院七〇三所张信平，邬扬杰（任付组长）等组成燃气轮机试验站和测试技术考察组，到美国航空系统工程公司，通用电气公司（伊文但尔），海军船舶工程站，通用电气公司（施甘那克塔迪）、联技公司、索拉公司、海军航空兵返修站、DD-965舰等八个单位进行了考察。在考察过程中参观了“航空发动机改装型”，“舰用（陆用）燃气轮机型”“燃气轮机系统型”等三种类型的试车台20余座。其中大部分是生产型的，少量是科研型的。现将这些试车台的建造特点简述如下。

一、关于试车方法的几个问题

1. 对于航机改装的舰用发动机，有些厂家是先做发生器部分的试验，然后再进行整台燃气轮机的试验。例如通用电气公司的LM 2500燃气轮机就是按照这么一条路线进行的。考虑到动力涡轮的设计是长寿命的，因此在海军航空兵返修站对上述燃气轮机通常就只返修和试验发生器部分。试验发生器时采用发动机本身的进气导流罩，并以尾喷管来模拟动力涡轮。试验这种航机改装发生器的试验台，国内外已有大量文献作过介绍，本文不赘述。

2. 舰用（陆用）燃气轮机有些是按专门的要求进行设计的，对于这种类型的发动机总是作为一个整体来进行试验的。通用电气公司（施甘那克塔迪），索拉公司等都用这种方法。

3. 对于上述两种试验方法设计出的试车台，除应急系统（如滑油系统）和测量系统及燃油系统外，主要采用燃气轮机本身的系统来进行试验。而燃气轮机系统型的试车台，除了采用本身的系统外，各个相联装备（如齿轮箱等）的布置亦力求和实际情况（如舰艇上）接近。实在有困难时亦尽量争取和实际情况不要有太大的偏离。例如在海军船舶工程站中两台LM 2500燃气轮机并车试验时，碍于装置布置，在厂房当中进、排气道不可能模拟舰上的状态，只能增设了弯头伸出厂房外。此时他们给定的条件是保证两种情况的阻力相同。另外，用水力测功器代替螺旋桨时，因厂房的长度有限，齿轮箱与测功器间的传动轴只能做得比实物短些，但整个装置按装得像在舰上一样带有一定的斜度。至于水力测功器转子和螺旋桨的惯量不同则是采用专用的装置来加以模拟的。

二、试车台总体工艺设计

在布置试车台的方向时，要注意当地的长年风向，这是很重要的。不能由于风向的原因使排气道排出的燃气又从试车台的进气口吸入发动机，这将引起发动机升温和出力下降。

我们参观的试车台有三种型式：

1. U型。垂直进气，垂直排气。通用电气公司（伊文但尔），索拉公司等采用的是这种型式。

2. 由侧面转垂直进气，由垂直转侧面排气。通用电气公司（斯甘那克塔迪），海军船舶工程站采用的是这种型式。

3. 山型。垂直进气，垂直排气，当中是排气道冷却空气的进气道，在试验发生器时采用这种型式的试车台。海军航空兵返修厂的试验站用的就是这种型式。

(一) 燃气轮机准备间

舰用（陆用）燃气轮机的试车台不像航空发动机的那样在试车台邻近设有专用的准备间，以供安装尾喷口、进气道等等之用。而是有的与总装工段（车间）相毗邻，例如通用电气公司（斯甘那克塔迪）就是把总装工段和试车台放在一个车间里，中间通道的一侧是总装工段，另一侧是试车台，总装好的机组用起重机完整地吊到试车台上进行试车，有的则把机组在另外的厂房里总装完毕，再用平板车送到试车台，例如通用电气公司（伊文但尔），索拉公司等。他们之所以可以这样做，主要是由于采用了整体底架带箱装体，没有更多的工作需要在专设的准备间中进行。

这里要着重介绍气垫运输的问题。通用电气公司（伊文但尔）在试验LM 2500燃气轮机的M45°、M46°的车间里备有气垫平台。它的外形和一般的整体底架没有什么区别，只不过是在底架的底部设有许多喷咀，压力空气由喷咀中喷出，依靠反作用力把平台垫起。当平台上不安设任何东西时，整个平台可以由两个人缓慢地推动它。若LM 2500燃气轮机机组安装在气垫平台上时就需由4个可移动的千斤顶来移动它。平台的移动范围只限于车间内。上述车间内同时装有30吨的起重机。在这种情况下为什么还要用气垫平台呢？原来由于进、排气道是垂直向上安置的。在进、排气道这一区域内起重机无法工作，因此只能采用这种辅助的手段来进行移位。由此可以看出，他们只把它当作一种局部地区移位的设备，并不是一种能够取代起重机的运输工具。采用气垫平台时对地面的要求并不特殊，只不过是在一般水泥地的表面上涂了一层塑料涂料（我们去参观

的各个单位都在水泥地面上涂一层涂料，它防滑、耐油）。而且把地面上所有的孔都用填料堵死，以保持地面上没有任何空穴。

(二) 试车间各部分的设计

1. 试车间进气部分

(1) 试车间进气道型式

上述各单位大部分试车间采用垂直进气道。从消音角度来看，垂直进气道能衰减较多的噪音，每折一次直角约可降低10分贝。为了改善气流的流场，在直角转弯处安装了导流片。

(2) 进气道的压力降和流速范围

进气部分的压力降一般不大于50毫米水柱。进气部分的气流速度一般采用15~30米/秒。

(3) 消音片

航空系统工程公司推荐采用在一层薄的板式消音片后安设一层厚的板式消音片。消音材料的密度为80公斤/米³。

2. 试车间部分

(1) 试车间的布置型式

上述各单位大部分试车间的布置型式是封闭式的，墙壁和屋顶都用钢筋混凝土浇筑而成，见图1。大门采用钢质的隔音门。

(2) 燃气轮机中心线安装高度

单机试验时中心线安装高度距地面约为2米。这个高度是由机组、支架、整体底架等的高度来决定的。它应考虑到操作方便和使进口流场比较均匀。

这些单位采用“低位”布置是因为他们目前生产的几型机组都是整体底架带箱装图的。各个辅助系统（滑油、测量系统）和设施都是根据这个要求而布置的，所以有这个可能。航空系统工程公司在设计底架时力体避免底架的刚度和频率可能在试验中产生影响。

在系统试车台上，如海军船舶工程站，则采用“高位”布置。底架下的支撑力求和实船上的情况相类似，以便再现舰上可能出

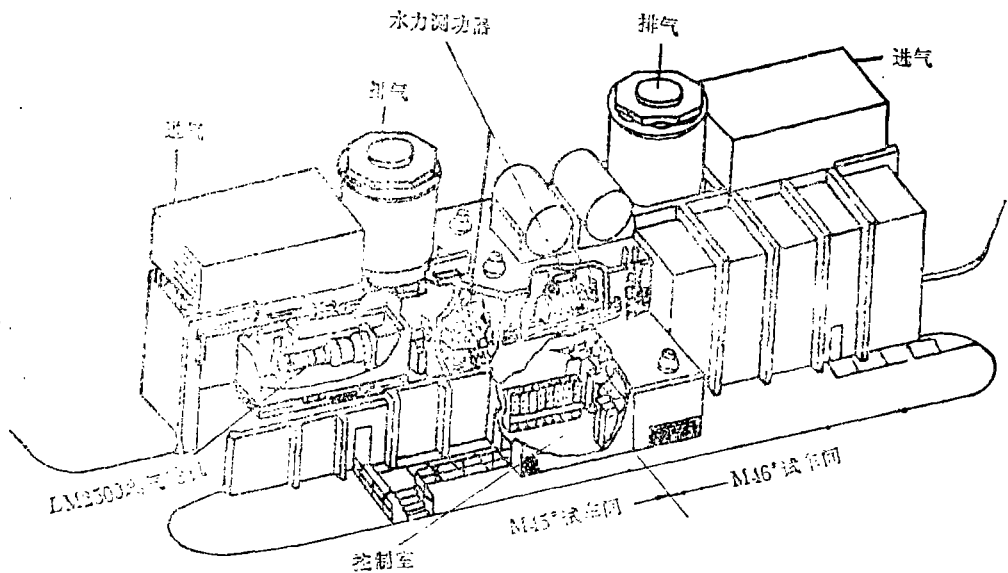


图1 通用电气公司(伊文但尔)燃气轮机试车台

现的情况。

(3) 基础

在试车间里,一般都浇铸了大块的钢筋混凝土基础。在它上面有两种情况。一种是只设置简单的地脚螺钉孔,如索拉公司,通用电气公司(伊文但尔)。另一种是在上面敷设铸铁平台,如海军船舶工程站。在机种比较单一时采用前者是合理的。如果考虑到被试的系统要经常变更时,则还是应该采用后者。

(4) 起重机

室内的试车台普遍采用起重机作为基本的运输工具。具体的吨位依据被试的对象而定,从30吨到100吨左右都有。值得一提的是他们的起重机并不都是标准的。而是根据不同的跨距安设不同尺寸的起重机。如通用电气公司(伊文但尔)的M45*、M46*试车台就是如此。这有利于缩小试车间的尺寸。

(5) 试车间的尺寸

除了海军船舶工程站是由四个竖跨和一个横跨所组成的大车间以外,其余新建的试车间都力求缩小试车间的空间。航空系统工程公司在设计试车间时把这条作为一个主要的原则。通用电气公司(伊文但尔)的M45*、

M46*试车台把高噪音源部分(发动机)和低噪音部分(水力测功器)分隔开,这样对于隔音的处理就要经济和方便一些。两个试车台的水力测功器背靠背地布置在当中的独立的厂房中。监视测功器的人员在运行时可以不进入发动机车间内,从而改善了工作条件。据称他们原来还打算把两台测功器串联起来加大测功的范围。

3. 试车间排气部分

排气道内气流速度的选取与消音装置有关。在使用板式消音器时,航空系统工程公司建议排气道内的气流速度一般不应大于40米/秒,否则将引起消音器变形,并产生“次生”噪音。

为了改善排气消音器的工作条件和降低造价,他们都力求降低排气道的温度。例如海军航空兵返修站就采用引射空气的方法来降低排气道内的温度(对于发生器试车台,传统的方法是采用喷水冷却。这种冷却方法对排气道内的消音材料有较高的要求,如抗腐蚀等)。在排气道足够长时,亦有采用穿孔扩压器的,见图2。即在排气扩压段后接一段管道,上面钻孔,总开孔面积 A 按下列公式计算:

$A = (1.5 \sim 2)$ 管道截面积

开孔率约为30~40%。这种消音器在不同频段范围内可降低6~20分贝。板式消音器内的消音材料采用长纤维的玻璃纤维,其密度为100公斤/米³。

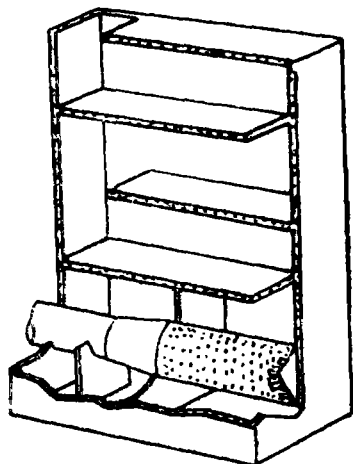


图2 穿孔扩压器

4. 通风

燃气轮机在试验过程中若不带箱装体,那么通过发动机外壳将散发出大量的热量,对此目前尚无简便的方法进行计算。航空系统工程公司在初步估计时取它等于~1%燃油量的发热值。这部分热量不允许在车间内逐渐积累,必须设法排出室外。索拉公司在厂房的一端安设了一个引入冷却空气的进气道,而在厂房的另一端安设两台抽气机把室内的热空气抽出。但这种配置方法将会使厂房内存在一些负压,在建筑上应予以考虑。

(三) 试车台的工艺系统

1. 冷却水系统

上述单位的试车台大多采用水力测功器来吸收功率,少量的采用电测功器(利用放在水中的电阻把电能变成热)和机械负荷(如压机等)。在样机试验时进行全负荷的长期试车,但在生产性试车时只试验几个小时即告结束。因此除少数特定的装置外,发动机发出的功率一般是不回收的。因为回收这部分能量要增加大量的投资,这是不合算的。

根据他们提供的供水量可以算出,采纳的设计依据为16~20公斤/马力小时(这当然和当地的气温有关)。冷却塔大多是第二代的板式结构,占地面积较大。海军船舶工程站附近就是河流,因此冷却水直接从河中吸取。

2. 天然气系统

通用电气公司(斯甘那克塔迪)工业用的燃气轮机备有气态和液态燃料用的喷嘴供选用,但在厂内试验时不采用实际的气体,因为没有这种气源,故只能在现场进行调试。索拉公司有一套庞大的管道煤气供应系统,它包括压缩机、冷却器,调压阀等,只适应所需的气体压力和温度。

3. 滑油系统

由于采用箱装体和整体底架,滑油系统一般是自带的。但试车台都备有大小不等的备用系统供需要时使用。

4. 消防系统

通用电气公司(伊文但尔)M45°、M46°试车间只是在LM 2500燃气轮机排气管附近安设了自动灭火系统。采用的灭火剂为化学药品Halon(成份不详)和二氧化碳。其他都是放置一些可移动的灭火器材。

5. 测量系统

在参观中我们发现,上述单位在对箱装体的燃气轮机进行试验时测量点较多,采用的设备亦比较先进、完善。例如航空系统工程公司设计,供应的利用微机控制的数据采集控制仪器就被几个单位所采用;又如索拉公司在进气消音器后专门增设了一段管道,在管道中安有文杜利管,用来测量空气流量。而系统试验则不进行详测,只是采用舰上的设备而已。至于所谓科研性试车台,在土建及公用系统方面与生产型的差别不大,只是测试系统更为完善一些,例如增加了烟气分析、流量(空气、滑油、燃油)、压力和温度的测量点而已。

索拉公司的试车台采用两个旋转臂把所有的测量导线和导管都集中敷设在臂上,机

组安装时旋转臂转到紧靠试车间壁面的位置上。俟机组安装完毕后将臂放到机组上部，便于测量接线的联接。

这些试车台控制室内的观察窗都做得很小，不足1米²。他们主要依靠电视摄像系统来监视机组，这无疑对观察窗的隔音处理带来了方便。

水力测功器的校正仍然采用惯用的砝码静校法。对于滑油耗量的测量，航空系统工程公司建议采用重量法，这对燃气发生器来说还比较容易办到，对于采用滑动轴承的动力涡轮和并车齿轮箱这样的重型结构来说无疑是较困难的。

表 1

| | | 倍频中心频率 Hz | 32 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|-----------------|---------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| 25000HP 等级的船用主机 | 进气 (分贝) | | 125 | 125 | 125 | 130 | 130 | 130 | 145 | 155 | 150 |
| | 排气 (分贝) | | 145 | 150 | 150 | 155 | 155 | 150 | 150 | 150 | 140 |
| | 壳体 (分贝) | | 125 | 130 | 135 | 140 | 135 | 140 | 135 | 140 | 130 |
| 3500HP 等级的船用辅机 | 进气 (分贝) | | 110 | 110 | 115 | 115 | 120 | 125 | 125 | 125 | 125 |
| | 排气 (分贝) | | 130 | 130 | 135 | 135 | 135 | 135 | 130 | 125 | 124 |
| | 壳体 (分贝) | | 95 | 100 | 105 | 105 | 110 | 115 | 115 | 115 | 115 |

(二) 噪声控制标准

根据联技公司的经验，住宅区在60分贝以下不会引起人们的烦恼，63分贝将引起干扰，到72分贝以上人们将采取行动进行控

告。通用电气公司（伊文但尔）设有计算机中心。它把本部和外地所采集到的数据通过通讯系统集中起来，利用本部强大的技术队伍来分析处理试验的数据。节约了人力和经费，充分发挥了有经验人员的才能，提高了工作的质量。

三、发动机噪声

(一) 发动机的噪声

ASME 报告 T4-GT-110上指出，在没有实际测量数据的情况下，可采用表1的数据来进行船用燃气轮机消音设备的设计。文章指出，这些数据是偏保守的。

告。

控制室内的噪声为85分贝时，试车人员在控制室内高声喊叫尚可以相互联系，故不应再高于此值。

表 2 美国不同环境的噪声标准 (基准0.0002达因/厘米²单位分贝)

| 倍频程频带 Hz | 37.5~ 75 | 75~ 150 | 150~ 300 | 300~ 600 | 600~ 1200 | 1200~ 2400 | 2400~ 4800 | 4800~ 9600 |
|----------|-------------|------------|-------------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| 轻工业区 | 77 | 67 | 59 | 50 | 50 | 47 | 44 | 42 |
| 城市住宅 | 74 | 62 | 53 | 48 | 44 | 42 | 38 | 36 |
| 近郊区 | 72 | 57 | 48 | 43 | 39 | 36 | 33 | 31 |
| 农村 | 67 | 52 | 43 | 38 | 34 | 32 | 28 | 26 |
| 损害赔偿 | 115 | 105 | 95 | 85 | 85 | 85 | 75 | 90 |

(三) 消音装置的型式

我们所见的试车台大都采用板式消音

器，表面覆盖了穿孔钢板。航空系统工程公司建议穿孔钢板的穿孔率大约为30%。

四、几点体会

1. 美国工厂的厂房大多采用钢结构（表面喷有防火抗腐蚀的涂料），密闭，用人工采光，装有空调等设施。试车间的建筑则用钢筋混凝土浇筑而成。这样在隔音的处理上就比较容易达到要求。至于进、排气的消音设施则和国内已采用的相类似，有的甚至还要差一些，这是由他们的实际情况所决定的。例如有的工厂本身就在极其喧闹的地区（如索拉公司的老厂位于圣地亚哥市飞机场旁边，飞机起飞降落频繁），背景噪音远远超过建筑物中燃气轮机传出来的噪音；又如有的工厂四周没有什么邻居等等，因此降低要求是完全合理的。由于他们的情况和我国的实际不一致，因此一些经验不能简单地搬用。

2. 上述这些单位中的单机试车台总的说来都建得较为紧凑、简单，只能满足某几种型号发动机的试验用，通用性较差。而通用性较强的海军船舶工程站就不得不采用高大的厂房，重吨位的起重机，庞大的公用系统。看来要想在一个试车间内既能进行单机试验，又能进行系统试验，只能采用系统试验台的型式才有可能。

3. 纵观这些单位的试车间使我们更加明确，什么样子的试车间可以称为当前世界水平。归纳起来不外乎两条，一是在厂房建筑上要满足消音，隔音，通风，振动等方面的要求；另一个就是要有先进的测试手段和自动控制操作系统。这些给我们今后的建设提供了有用的依据。

（参考文献略）

（上接20页）

续表 4

| 位置的号码 见图 5 | 设计点 | | | 空载状态 | | |
|---------------|-----------|--------|------------------|--------|--------|------------------|
| | P 巴 | T K | ϕm 公斤/秒 | P 巴 | T K | ϕm 公斤/秒 |
| 3. 燃气 | 17.1 | 1325 | 62.44 | 2.85 | 761 | 17.81 |
| 4. 燃气 | 1 | 725 | 62.44 | 1 | 616 | 17.81 |
| 5. 空气 | 18 | 750.5 | 3.287 | 3 | 448 | 0.49 |
| 6. 空气 | 32.7 | 910.7 | 3.287 | 6.45 | 585 | 0.49 |
| 7. 产生的燃气 | 30.6 | 862 | 5.378 | 5.1 | 862 | 0.81 |
| 8. 燃油 | 1 | 423 | 1.174 | 1 | 423 | 0.17 |
| 9. 水 | 1 | 298 | 0.922 | 1 | 298 | 0.14 |
| 压力损失 (巴) | 从属的燃烧室 | | 0.8 | 0.6 | | |
| | 气化器 | | 1.0 | 0.5 | | |
| | 蒸汽发生器 | | 0.3 | 0.25 | | |
| | P_7/P_2 | | 1.7 | 1.7 | | |

轮机的输出功率是减少了，但是燃气轮机部分负荷的工作未明显地受气化器工作的影响。所以部分负荷效率将主要决定于燃气

轮机循环在部分负荷下的性能。

（许德林、吉桂明摘译自“transactions of the ASME J. Eng. for Gas Turbines and Power”1935. 107 (3). 769~774.