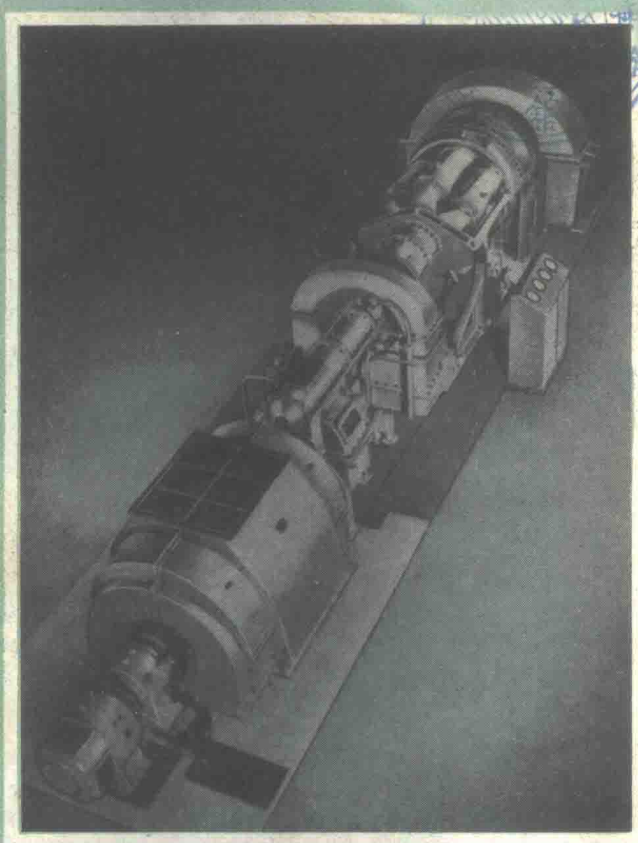


燃气轮机文集

上册



水利电力出版社

燃 气 輪 机 文 集

下 册

上海汽輪机厂技术情报組編譯

水 利 电 力 出 版 社

內 容 提 要

本书为燃气轮机文集的上册，内收集苏联及美英等国杂志上发表的有关燃气轮机的短篇论文15篇。其内容主要介绍燃气轮机的设计、制造等方面的新技术，如通汽部分的设计方法的改进，计算时线性方程式的采用，燃气轮机装置型式选择的探讨以及燃用两种燃料的燃气轮机等。

本书供燃气轮机设计和制造方面的工程技术人员及科研人员进行阅读，也可供我国高等学校动力机械系燃气轮机专业的师生作参考。

燃气轮机文集 上册

上海汽轮机厂技术情报组编译

*

2275 R 497

水利电力出版社出版（北京西郊科学路二里内）

北京市书刊出版业营业许可証出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经售

*

787×1092 $\frac{1}{2}$ 开本*6 $\frac{1}{4}$ 印张*132千字*定价(第10类)0.97元

1960年2月北京第1版

1960年2月北京第1次印刷(0001—3,240册)

內 容 提 要

本书为燃气轮机文集的下册。书内包括短篇论文14篇，主要介绍捷克及美、英、法、日、意、瑞士等国目前用于电站、船舶、飞机及冶金工业的各种类型的燃气轮机装置。通过本书，读者可以了解世界各国燃气轮机的发展现状。

本书供从事燃气轮机设计和制造工作的科研人员和工程技术人员阅读，也可供高等工业学校燃气轮机专业的师生作教学参考用。

燃 气 轮 机 文 集 下 册

上海汽轮机厂技术情报组编译

*

2297D451

水利电力出版社出版（北京西郊科学路二里内）

北京市书刊出版业营业许可证出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经售

*

787×1092 $\frac{1}{16}$ 开本*5%印张*116千字*定价(第10类)0.79元

1960年2月北京第1版

1960年2月北京第1次印刷(0001—2,940册)

前 言

苏联的功勋科学家B.烏瓦洛夫教授，在今年一月六日的真理报上著文說：“……我們认为，在火力发电站中，除了汽輪机以外，占重要地位的应当是燃气輪机；因为燃气輪机是一种最新型和最先进的热力发动机。它比汽輪机要便宜一半以上。在制造方面，燃气輪机每瓩的金属消耗量也只有汽輪机的一半。同时电站的基建投資将大大减少，基建工期也能大大縮短。”他并且建議：“从七年計劃的第四年或第五年开始就建設一些安装有燃用液体或气体燃料的燃气輪机的火电站。为此，从1959年起，就应该着手进行設計和制造10万、15万、20万和30万瓩的燃气輪机。”

燃气輪机在铁路运输中，也愈来愈被重視起来。因为燃气輪机与同样重量的內燃機車相比，功率要大一倍，这就增加了機車的牽引力，从而提高了列車的运输能力。同时燃气輪机燃用的是重油，而不象內燃機車需要昂貴的柴油。

燃气輪机在航空方面，近年来已达到了压倒活塞式发动机的优势地位。在航海方面，燃气輪机的前途更为广闊。尤其是一些快速的軍用艦艇，装用燃气輪机更为适当。而且国外的汽車制造工业，也在利用燃气輪机来作为汽車的原动力。目前世界各国都在大力发展燃气輪机的制造，和进一步研究提高燃气的温度和机組的效率。

在我国燃气輪机的制造和应用，显然还在萌芽茁长阶段，但在党的总路綫的光輝照耀和全国大跃进的鼓舞下，我国燃气輪机的事业，也是会不断发展起来的。

为了满足关于燃气輪机研究、制造、应用和教学等方面的要求，我們从各国的期刊杂志中选择了这方面的文章三十几篇，分上下两册出版，内容主要介紹苏联、捷克、英、美、法、德、意、日、瑞士等国家对于燃气輪机設計和制造的經驗。这里面有：通流部分的設計，机組型式的選擇，工作循环的研究，影响效率提高的因素，燃用气体、液体、固体燃料的探討，制造上所用的耐热材料，鈹腐蝕及其預防等。此外还介紹了世界各国已經設計和制妥的燃气輪机的类型、結構、运行經驗，以及今后的发展方向。我們希望这本书对我国燃气輪机事业的发展有些帮助。

由于我們資料較少，力量有限，所編选的文章，面还很狹窄，不够广泛。此外，因为時間匆促，在翻譯和校对过程中难免有錯誤存在，希望讀者們給我們提出寶貴的批評和指正。

譚 道

目 次

一、 蒸汽和燃气透平通流部分的设计法.....	1
二、 固定式燃气轮机装置型式选择的探讨.....	9
三、 固定式燃气轮机装置型式的选择.....	12
四、 燃气轮机计算中线性方程式的采用.....	16
五、 燃气轮机的冷却对其效率的影响.....	28
六、 燃气轮机转子上的温度分布.....	37
七、 具有空气锅炉以开式过程工作的燃气轮机循环的研究.....	39
八、 汽车燃气轮机循环的布置.....	43
九、 燃用固体燃料的实验燃气轮机装置的试验.....	53
十、 多次中间冷却和多次供热的燃气轮机装置.....	59
十一、 燃气轮机转子内部液体冷却的应用.....	63
十二、 燃用粉煤的闭式循环燃气轮机.....	68
十三、 液体燃料中的钒对燃气轮机工作的影响.....	75
十四、 燃用两种燃料的燃气轮机装置.....	82
十五、 苏联列宁格勒金属工厂制造的 ГТ-12-3 型燃气轮机.....	87

目 录

十六、英国船用燃气轮机.....	99
十七、英国第一台用在钢铁厂的燃气轮机组	123
十八、捷克列宁工厂燃气轮机的制造及发展	129
十九、捷克布尔诺哥特瓦尔德第一工厂燃气轮机的制造及发展	138
二十、大型发电用燃气轮机的设计	144
二十一、燃气轮机列车电站	150
二十二、美国铁路用燃气轮机车	155
二十三、用于比利时冶金工业的燃气轮机	157
二十四、法国塞恩脱—第士叶尔电站的燃气轮机	161
二十五、功率为10,000匹马力的船用燃气轮机	163
二十六、冶金工厂中燃气轮机运行的经验	166
二十七、意大利“飞亚脱”公司的燃气轮机汽车用燃气轮机装置	174
二十八、日本第一台船用燃气轮机	175
二十九、原子发电站使用的燃气轮机	177

十六、英国船用燃气轮机

特留比·巴特

最近十年来英国各制造厂根据英国海军部的订货共制造和试验了六种海船用的燃气轮机，此外，制造厂还提出了两种燃气轮机供审查。

设计船用燃气轮机的问题在英国提出已久，早在1941年法尔保罗的实验航空工厂，已致力于燃气轮机装置的设计工作，同年“茂伟公司”制造的第一台装置进行了试验。关于将航空燃气轮机作为船用发动机的课题，是由该公司和海军部的代表首先进行了讨论，随后在1943年签订了生产三台“盖特利克”发动机的合同。

签订合同后的十年中，共制造和试验了六种不同结构的发动机。此外，制造厂又制造了两种发动机，其中某几种燃气轮机对船舶制造业来说是具有一定先进意义并值得给予研究的。本文的目的即在于指出目前英国船用燃气轮机的发展状况，并对它们在运行中所积累的经验和予以分析。

I. 战艇上用的发动机装置

高速艇是采用燃气轮机的主要对象之一，在这种艇中燃气轮机的结构特性得以全部有效利用。因此，燃气轮机在这个领域中很快地被采用，目前对“盖特利克”和“G2”型两种简单开式循环的燃气轮机装置，已积有若干运行经验。

“盖特利克”燃气轮机

1943年8月英国海军部与“茂伟公司”签订了供应三台开式循环的单轴燃气轮机装置合同，这是以F2型航空涡轮喷气式发动机的结构作为基础而设计的。在发动机的排气口现在装上燃气轮机替代喷气喷嘴，这样可保证获得有效功率。试验的基本任务是在于研究运行周期较短的航空用燃气轮机的潜在能力。设计成的燃气轮机取名为“盖特利克”，它的纵剖面见图1所示。由于F2型发动机是以煤油作燃料的，又因煤油不适用于船用装置，故将燃烧室改为用柴油作燃料。在第一次试验后发现煤烟析出现象，后

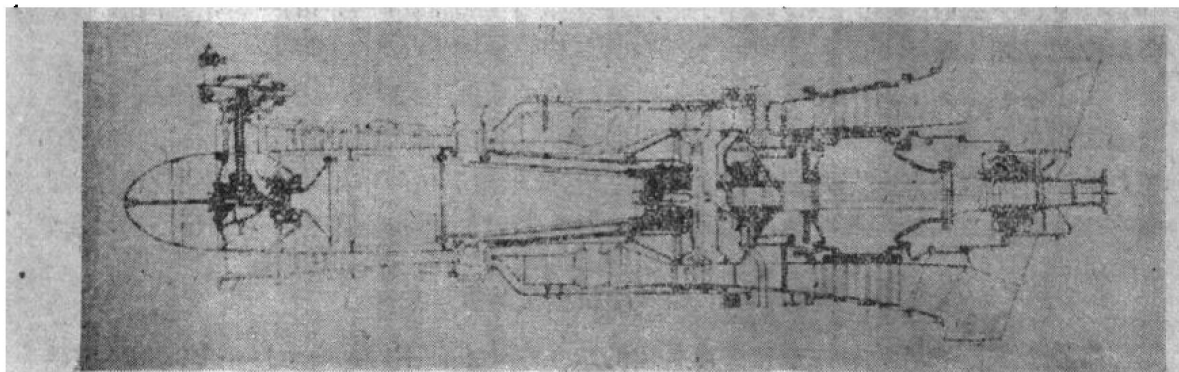


图1 “盖特利克”燃气轮机的纵剖面图

来将燃料噴霧器略予改善，并将一次空气和二次空气用的孔口尺寸和位置改变，再将管形燃燒室的直徑略予增大后，就使全部燃燒得到滿意的結果。

第一台发动机在試驗台上的試驗在1946年4月开始，当时发现，必需将驅動压气机用的燃气輪机的功率作若干改变后才能获得要求的特性曲綫。同时为了保证燃气輪机裝置的正常起动机見，决定在第五級后面装一閘門，以便将部分空气排入大气。“盖特利克”燃气輪机裝置在短期試驗时的燃料耗用量与功率的关系曲綫見图2所示。图2内还列有其他类型的船用燃气輪机的燃料耗用量曲綫。

1947年7月第一台燃气輪机发动机裝置安装在MGB2009艦上，該艦于同年8月下水(見图3)。

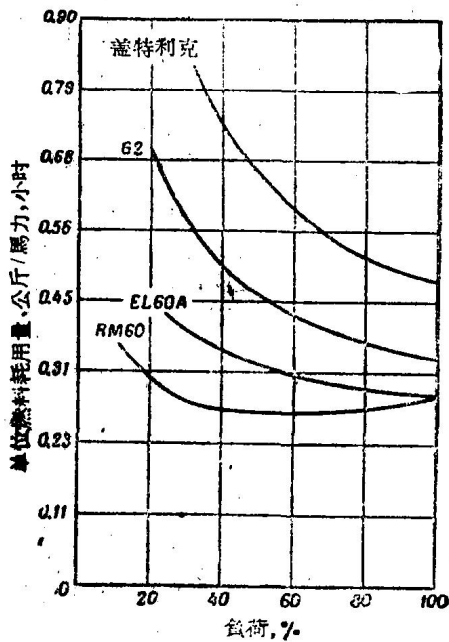


图2 燃气輪机发动机裝置的燃料耗用量曲綫

燃料—汽油；发热量—10,000大卡/公斤。

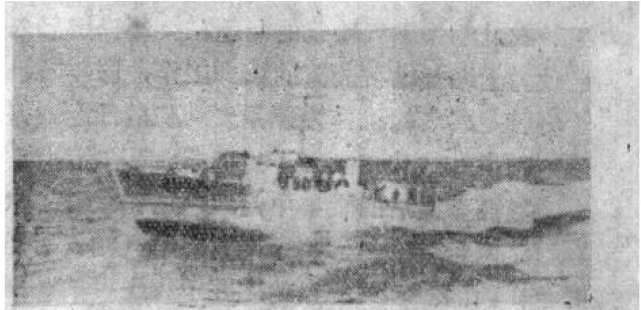


图3 装有燃气輪机裝置的MGB2009艦

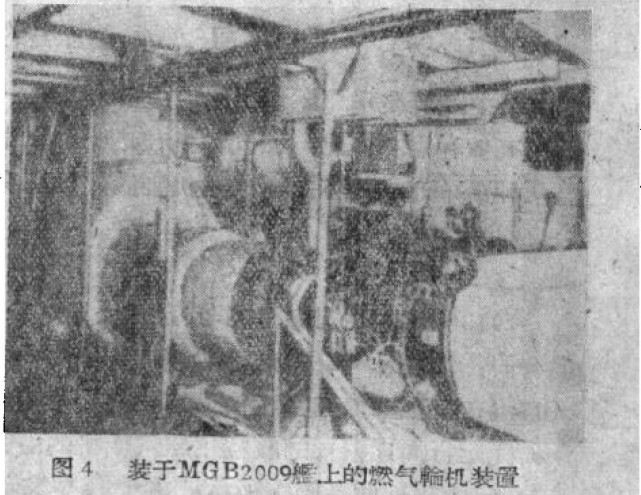


图4 装于MGB2009艦上的燃气輪机裝置

其他的主要任务是在于积累燃气輪机在航行时的維護、操縱和安裝的經驗。“盖特利克”燃气輪机装在該艦上用以替代三台“派格尔特”汽油发动机中的一台，它的若干零件的位置見图4所示。

由于燃燒室的出口气流温度分布不均匀，故在最初几次試驗时发现燃燒室歪斜，以及动力燃气輪机的第一級叶片过热等缺陷。这时“茂偉公司”已制成了薄膜冷却式的燃燒室，将这种燃燒室装在“盖特利克”发动机上后，虽然温度場的不均匀性未能完全消除，即装在燃气輪机进口处的四个热电偶的示度之差約50°C左右，但上述各种缺陷已不再发现。

“盖特利克”燃气輪机裝置的試驗总结

“盖特利克”燃气輪机在进行海洋試驗的四年內一直在不停歇地运行，第四年末对該类型的燃气輪机的运行特性确定如下：

1. **一般結論** 在船舶上采用燃气輪机是完全正确的, 并且是完全可實現的。这种新型发动机的主要性能很好地滿足高速艦艇所用发动机的要求。

2. **压气机通流部分的盐垢** 压气机通流部分的盐垢使燃气輪机装置的运行和特性恶化是早预料到的。由于空气中充滿了盐分, 必然会影响船用燃气輪机的运行, 对 MGB 2009型的小型高速艦艇上的燃气輪机影响更大。空气过滤器的設計, 就考虑到要防止盐分进入压气机, 吸入的空气先通过沉淀室后再进入压气机。但空气在这个装置中還未能彻底滤清, 因此在运行120小时后, 压气机的效率就較額定数值降低了5%, 发动机的功率也較額定数值降低了14%。經檢查后發現, 这是因为在压气机的叶片上有盐垢所致。

为消除盐垢起見, 在压气机的进气口上装一个环, 环上装有几个噴水嘴, 噴水嘴之間的距离相等。当噴入45.5升的蒸馏水后(装置不停止工作), 压气机的效率就能升到額定数值的98%, 装置的功率也增到額定功率的97%, 第二次这样地冲洗后, 这些参数完全恢复到額定数值。因此在装置的运行过程中, 每隔3~12小时(視发动机工作的恶化情况而定)向压气机內噴水45.5升, 水的流量约为9升/分, 經過这样简单的措施后, 压气机通流部分盐垢的有害影响就完全消除了。在結構較新的船用燃气輪机装置內(G2, RM60), 也装有类似这样的冲洗海洋空气用的設備。

3. **軸承** 当“盖特利克”燃气輪机的試驗将近結束时, 曾因軸承損坏而发生两次事故, 以致对一般的滾珠軸承和滾柱軸承是否能在燃气輪机的高温高压条件下长期工作(特别是在航行条件下)产生了怀疑。

4. **噪音强度** 在未采取任何降低噪音的措施以前, 首先对噪音强度进行了研究。机器房內的最大噪音强度达117分貝, 音源是燃气輪机的減速器。甲板上司令台后面的主要音源是压气机, 司令台上的噪音强度达102分貝, 它的音源是空气过滤器。

最强烈的音源是由于压气机的工作, 以及通过吸气管和空气清洁室而产生的高頻率組合噪音。

在空气清洁室的壁上用玻璃纖維隔音, 并在吸气管上装了灭音器(用玻璃纖維制的)后, 噪音强度降低了39分貝。在烟囱上也装有“托尔俾道”型灭音装置。

5. **机器房的冷却和絕热** 由于燃气輪机旁边还装有两台汽油发动机, 故燃气輪机被盖复在一个通风的罩壳內。燃气輪机的气缸上复有50毫米厚的石棉絕緣物, 再罩上輕金属制的罩壳(有空气夹层), 噴射器将空气吹送到罩壳与石棉之間。用这样的冷却方法来冷却燃气輪机是极有效的, 因此也被运用到其他更新型的燃气輪机上。在开始时是用直徑为317毫米的通风机将空气送入罩壳, 但用噴射器較为适宜。

6. **压气机叶片材料** 在第一台发动机中, 压气机的叶片是用曾在銘酸槽中經過阳极处理的RR56合金鋼制成的。經過50小时的試驗后, 在叶片的某些部位上发现有晶間腐蝕的現象, 深度为0.125~0.25毫米。在用RR57合金鋼制造的叶片上并未发现腐蝕, 但如果压气机不經過冲洗, 这种腐蝕現象还是可能产生的。

7. **当以汽油发动机运行时燃气輪机的空轉損失** 起初为了消除这种損失, 在減速器与螺旋桨之間装一联軸器, 借此可在“派格尔特”活塞式发动机运行时将燃气輪机脫开。但經過試驗后發現, 当汽油发动机在全功率工作时, 燃气輪机內因“摩擦和鼓风”所引起的功率損失仅为13%, 因此将联軸器重又拆下。

燃燒重油的試驗 除进行航行試驗外, 另有两台“盖特利克”发动机在試驗台上进行

試驗(一台在“茂偉公司”的工厂內, 一台在海軍部实验室內), 并进行了各种液体燃料的燃燒試驗。燃气輪机在最高負荷时用重油作燃料运行沒有超过48小时, 說明在一定限度的時間內用重油作燃料运行是可以的。除噴霧器外, 所有的零件都經得起考驗, 整个发动机的运行情况良好。

在海軍部实验室內, 燃气輪机用重油作燃料的試驗共进行了200小时, 根据燃气輪机的状况, 它可运行1,000小时左右, 也不会使特性起很大的恶化。在 MGB2009 艦上装有利用排气余热的重油預热器, 但因船身损坏故仅进行了短时的試驗。

从“盖特利克”燃气輪机的运行經驗中(用重油作燃料)可得出下列各点結論:

- 1) 燃料必須經過仔細的过滤;
- 2) 为减少燃料泵的磨損起見, 最好在适度的加热温度下向燃燒室供給燃料;
- 3) 利用排气来預热燃料是实际可能的;
- 4) 工作气体最高温度为 750° 的开式循环船用燃气輪机装置, 可在短時間內燃燒重油。

“盖特利克”发动机的寿命原来設計为300小时, 但有两台这种結構的发动机已运行了約600小时。

G2 型燃气輪机

1948年12月“茂偉公司”接到了制造四台功率較大的燃气輪机的訂貨, 它們的結構是以“貝利尔”航空渦輪噴气式发动机作为基础, 与它連接的燃气輪机是通过螺旋式减速器將軸驅動。这种名为“G2”的发动机是装在两艘快速巡邏艇“鮑尔特·比奥尼尔”和“鮑尔特·巴特拉及尔”上作为在最高速度时的輔助机器, 在航行速度时和調向时則用柴油机。每台发动机驅動自己的螺旋桨: 燃气輪机驅動两侧的螺旋桨, 柴油机驅動中間的两个螺旋桨。图5所示为G2型燃气輪机的縱剖面图, 图6所示为它的外貌。

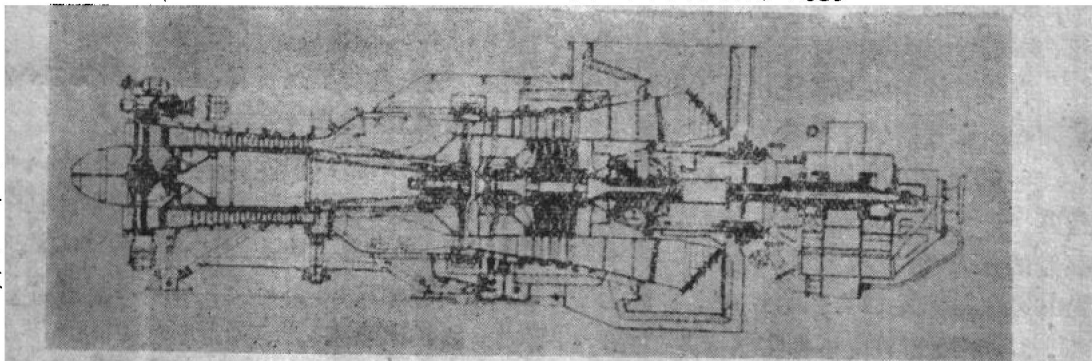


图5 G2型燃气輪机的縱剖面图

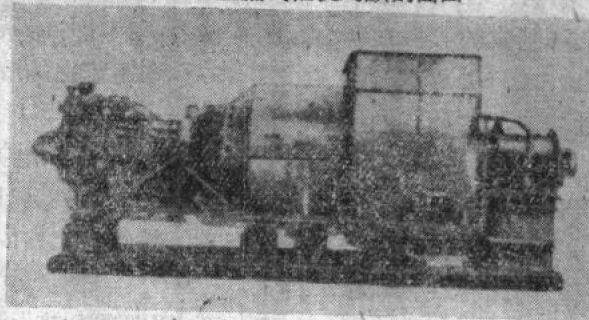


图6 在試驗台上的G2型燃气輪机

陆地試驗 第一台 G2 型燃气輪机在 1951 年制成, 但經過預先試驗后發現, 动力燃气輪机与煤气发生器之間有某些不協調, 以致在燃气的計算温度时得到的最大功率仅为 3,800 馬力。改装燃气輪机的导向机构需化很多時間, 因此决定将最初的两台 G2 型燃气輪机在低功率的情况下进行安装和試驗, 借以尽快地取得燃气輪机在海洋条件下的工作数据。

第三台发动机經過若干相应的改变后, 在 1951 年 12 月在試驗台上进行了試驗。整个功率变化范围内的燃料耗用量見图 2 所示, 从图 2 及附表 4 中还可看出, 如与“盖特利克”燃气輪机装置相比, 則 G2 型发动机的燃料耗用量較低、单位面积較小、运行寿命較长。在 5 年的期間, 大大改善发动机的特性是完全可能的, 因此完全有条件可在以后的燃气輪机和装置模型中获得更好的指标。在厂內的試驗过程中也进行了噪音的研究, 确定在发动机附近处, 空轉时的噪音强度为 102 分貝, 全負荷时的噪音强度为 114 分貝。

“鮑尔特”艇上的发动机装置 图 7 所示为 G2 型燃气輪机在“鮑尔特”艇上的位置图, 图 8 所示为“鮑尔特·比奥尼尔”艇的全貌。

空气过滤器和空气冷却系統与 MGB2009 艦上“盖特利克”发动机所用的相似: 利用排气余热的噴射器将通过机器房的空气滤清, 并将燃气輪机的发热部分吹冷。这样的空气冷却系統較之用絕热材料要簡便得多。

燃气輪机的軸直接通过減速器(不用联軸器)与螺旋桨的軸相連, 減速器的傳动速比为 4.73:1, 燃气輪机装置的起动机是依靠压缩空气和气动发动机进行的(參閱图 6, 压气机的左边)。

“鮑尔特”艇上的 G2 型燃气輪机在 1952 年末进行海洋試驗, 試驗后發現減速器排油泵的出力不够, 而使減速器淹沒。最初装的是一台出力为 160 升/分的进油泵和两台平行工作的排油泵, 排油泵的出力各为 160 升/分, 但平行工作的排油泵未能达到需要的出力, 因此改用一台出力为 205 升/分的油泵来替代这两台排油泵, 并将进油泵的进油量降为 115 升/分。

“鮑尔特·比奥尼尔”艇上的燃气輪机經 50 小时的运行后, 当机組的轉速增到 5,500

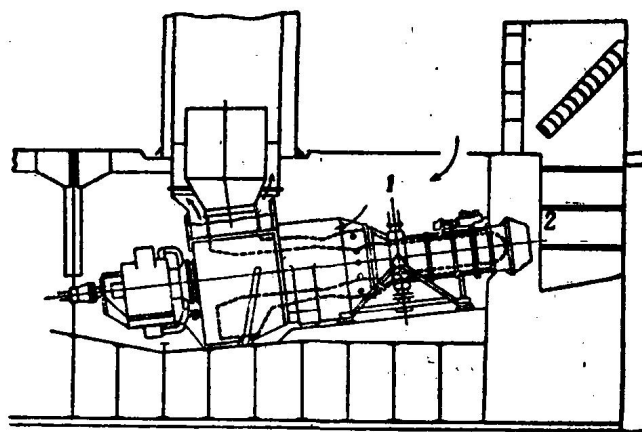


图 7 G2 型燃气輪机在“鮑尔特·比奥尼尔”艇上的位置图
1—冷却空气的气流; 2—灭音器的位置。



图 8 “鮑尔特·比奥尼尔”艇的全貌

轉/分时,在装置中听到輕微的撞击声,但这时的功率和效率都没有任何降低的现象,燃气輪机的进气温度的也没有任何变化。把压气机打开后发现末排有六片叶片根部断裂,并带有显著的疲劳断裂的征状。有几片叶片已通过燃燒室和燃气輪机,但未引起任何损伤。

在制造压气机时,已知末級工作叶片的自然振动频率与激振频率相近,激振可能是压气机排气管內橫柱(支柱)的影响而产生的。开始时我們认为,用两排固定的导向叶片可以消灭这种激振,但因支柱靠近导向叶片,以及支柱間气流的空气动力学条件与一般不同,因而这种振动非但不能消灭,相反有所增加。图9所示为压气机的末排叶片和支柱在修整前的展开图。上述各点缺陷經用取消第二排导向叶片并修整第一排叶片出口的方法后被消除(图10),因为这样以后,导向叶片与支柱間的空间变得很大,足以消灭排气流中的任何激振现象。以后未曾发现再有任何不良现象。

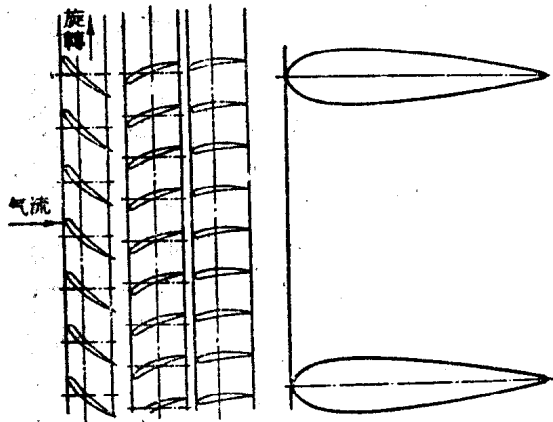


图9 G2型压气机叶片級在修整前的展开图

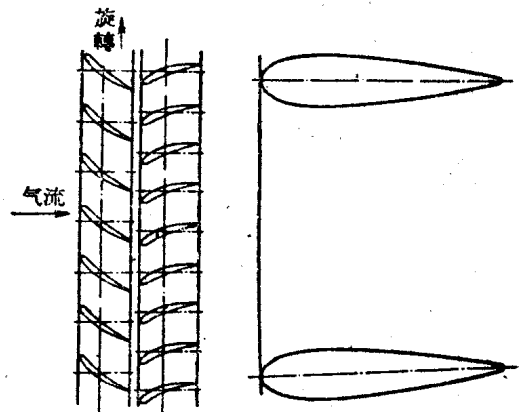


图10 G2型压气机叶片級在修整后的展开图

为进一步做好預防工作起见,又装了一些自动閥,借以将空气排入大气,自动閥在起动机自动开启,待机组的轉速达6,500轉/分后自动关闭。采用这样的措施后,使气流产生脉动的可能性减少,这种脉动会使压气机出口的騒动现象剧烈增加。

这些缺陷消除后,又因振动而产生了新的缺陷,影响到装在右舷上的燃气輪机的运行:压气机第一級上有一只工作叶片断裂,因而引起了重大的损伤。估計这只叶片是在验收試驗后打开压气机时损伤的,损伤的原因大約是因通流部分中有杂物存在。虽然事故产生的原因未能准确說明,但这个事实証明一定是有杂物落入,譬如,固紧不牢的螺母落入吸气管內会引起极严重的事故。

这次事故发生了五个月,在这台燃气輪机装置上(右舷上的)又发现压气机第二級工作叶片和导向叶片损坏的现象。为查明叶片损伤的原因曾进行了一系列試驗,其中包括压气机叶片的应变試驗,以便研究产生振动时的条件,这种振动是具有超过允許的大型脉冲。試驗結果証实,损伤的原因是由于压气机在低轉速时产生脉动流,从而产生“旋轉断裂①”所引起的。

① “旋轉断裂”现象的实质是:压气机中气流的断裂会发生在任何一段中,在发生断裂的地方,空气受阻并力图越过障碍物,因而气流分为两支。一支气流绕过断裂段走在前面(沿叶栅的运动方向),结果在这里的断裂现象就消除;另一支气流走在后面,在这里气流的断裂现象就加强并扩大开来。因此就产生了一段断裂气流。这段断裂气流在叶栅的旋轉方向(在绝对运动中)就发生扰动,但其角速度較小。由于这种由扰动而产生的“旋轉”段,就使轉子和靜子的叶片产生振动,而其频率是由旋轉段的数目和旋轉角速度决定的。

叶片的振动試驗指出，机組叶片的共振大約是发生在 3,000~4,800 轉/分的轉速範圍內。这些轉速較計算轉速为低，但压气机在这些轉速时（即在燃气輪机装置全部断开以前軸承冷却的一段时间內）是空轉的。因此将空轉时的轉速作短时的提高，并将結構改变，以保証叶片在所有的轉速範圍內都能安全地工作。

应当着重指出，G2 型燃气輪机装置的压气机与“貝利尔 1 号”渦輪噴气发动机上的压气机几乎是完全相同的，后者却很順利地經過了一切試驗，因此上述三个事故証实在船用燃气輪机装置上，即使采用已經过試驗和檢驗的航空用压气机，但叶片在低轉速时仍然会发生振动。

試驗 G2 型燃气輪机的另一目的，是为了了解燃气輪机装置上的滾珠軸承和滾柱軸承的使用情况。但因該艇在轉弯时船身发生劇烈振动，及在最初几次試驗时燃气輪机的軸承发生了两次事故，而使試驗的条件变得复杂化。因此对船身的振动以及它对发动机工作的影响进行了專門的研究。分析結果后發現，軸承上的振动負荷远超过正常的軸向負荷，因此滾珠和軸承套产生軸向振动，致使軸承套损坏。这种振动对以霧状油（油霧）潤滑的滾珠軸承來說尤其不宜发生。后来設計了压力潤滑系統，这种系統在燃气輪机的所有工作条件下（空轉和額定轉速时）都能起作用。另外又設計了一个限制器，借以消除航行时船身发生振动的条件，这样以后，軸承就不再发生事故了。在“鮑尔特·比奥尼尔”船上，大約由于船身采用了另一种形状，故未曾发生振动，軸承也沒有损坏的現象。

G2 型发动机的一般結論 在最初几次海洋試驗时，发动机发生了好几次严重事故，如果燃气輪机装置在試驗台上的試驗进行得更仔細的話，則这些事故是完全可避免的。显然由于“盖特利克”发动机未曾发生过事故，以致海軍部在驗收試驗时有所忽視，因此 G2 型发动机在国家驗收試驗以前在試驗台上仅运行了 37 小时。

从燃气輪机本身來說，这些缺陷并非是不可避免的：G2 型发动机的运行試驗指出，根据燃气輪机本身的特性，它是一台适用于高速艇上的好发动机。

根据該台燃气輪机装置在海洋中的运行試驗可得出結論如下：

1. **起動和操縱** 利用空气起動是既快速又簡單；在正常条件下达到空轉轉速約需 30 秒鐘，負荷的增加是自动調节的，即使在操縱杠杆“驟然”自空轉位置移到全功率位置时，燃料的供給也是在 12 秒鐘內徐徐增加，这与增加負荷的最大容許速度相符合。

装在压气机上用以防止低轉速时和轉速快速变化时空气流产生脉动的自动排气閥，其工作很可靠。

2. **压气机通流部分的盐垢** 为了用水冲洗压气机，装有与 MGB2009 艦上的燃气輪机装置相同的冲洗設備。压气机出口上的噴水环的給水是利用压气机中的压缩空气供給的。当压气机內产生盐垢时，运用这个方法后可使燃气輪机装置的正常特性重新恢复。压气机每隔一昼夜冲洗三分钟，这时燃气輪机装置的轉速为 5,000 轉/分，蒸馏水的流量为 45.5 升/分。仅从恢复功率这一点來說，这样頻繁的冲洗似乎不必要，但这样做后可預防腐蝕。

3. **停机前的冷却** 当燃气輪机在最大負荷下运行而必需停机时，必須以 4,750 轉/分的轉速空轉 5~15 分钟，直到軸承温度冷却到 90°C 为止。在某些情况下机組可在最大負荷时快速停机，且不会引起任何损伤。

4. **控制仪表** 为控制燃气輪机的工作情况，必須測量燃气的初温。“鮑尔特”艇上的

燃气轮机装置在試驗过程中曾有某些測量气温的仪表发生损坏，又因在高轉速时船身振动而使某些仪表的示数不正确。在結構較新的燃气轮机中不測量燃气轮机的进口温度，而是象在 G2 型燃气轮机装置中一样，只測量出口温度，因为这样才可采用更可靠的仪表(用于低温的)。此外，根据仪表測示的燃气轮机通流部分出口温度不正常增加的現象，迅速发现燃气轮机內的一切损伤。

在大型战艦上采用的燃气轮机装置 战艦上的发动机只在短時間內需要以全功率工作，而在其余的时间內这种笨重的船用装置都是在非滿負荷的情况下工作的，因此极需一种重量不大的燃气轮机作为补充功率(最大功率)时的发动机。燃气轮机是唯一体积小、重量輕、維護又不复杂的发动机。

在 MGB2009 艦上和两艘“鮑尔特”艦上，作为增力补助机器用的燃气轮机与航行速度时用的活塞式发动机是分軸的，但这种系統并非必要。因为在航行速度时可用汽轮机或自由活塞式燃气发生器的燃气轮机，同时航行速度时所用的装置和增力补助机器可共同在一根軸上工作。

对作为增力补助机器用的燃气轮机的要求是：輕巧、紧凑、工作可靠、高負荷时經濟性高和空气流量小。发动机的寿命可能不长。所有这些特性在航空燃气轮机发动机上都是具备的，因此英国海軍从航空燃气轮机制造方面吸取了大量的經驗。

利用船用燃气轮机作为主要发动机較之作为补充功率用的发动机(增力补助机器)要复杂得多了，但燃气轮机有很多优点，尤其是在 5,000~10,000 馬力的功率範圍內，为此制造了两台 EL60A 和 RM60 型的船用燃气轮机装置。

在航行速度时用的 EL60A 型燃气轮机

1946年9月“英电公司”接受了制造 EL60A 型船用燃气轮机的訂貨，这台装置装在“戈特根”巡洋艦上用以代替一台汽轮机。这艘巡洋艦是英国根据租借法案从美国获得的，战后又移交給海軍部。“戈特根”艦上原来装有两台功率为 6,000 馬力的汽轮机，每台都有电气傳动装置傳动螺旋槳。在这艘艦上安装燃气轮机的条件是很方便的，因为在設計时在艦上已早考虑到逆动情况，此外，发电机的功率和轉速都符合燃气轮机装置的要求。

制造这台燃气轮机的主要任务是：研究它在作为长期运行的船用发动机时的工作情况。制造这台燃气轮机时是以現有的同类型燃气轮机的結構和設計經驗作为基础的。不采用通常的輕型燃气轮机发动机，相反要求燃气轮机机組的重量要和它所代用的汽轮机装置重量相同。EL60A 型发动机是用来驅动装在右舷上的发电机，組合时适应艦上原有的面积(机器房和鍋炉房)。

● 循环 采用开式回热循环，燃气轮机前工作气体的最高温度为 704°，热交换器的回热度为 0.75。图 11 所示为 EL60A 型燃气轮机連同全部燃气管道、起动发动机和发电机的全貌模型。图 12 和 13 所示为該燃气轮机装置在制造厂試驗台上的状况。

采用空气分流系統后，通过动力燃气轮机的空气流量仅为总流量的 1/3，因而使該燃气轮机获得极高的效率。在轉速为 5,600 轉/分时功率达 6,500 馬力。选定这种系統还可使发动机的制造速度加快。压缩比也很良好，处在当时軸流或压气机所采用的压缩比範圍內。采用了节流閥和排气閥后毋需改变工况(轉速、空气流量、压缩比)，即可使压气

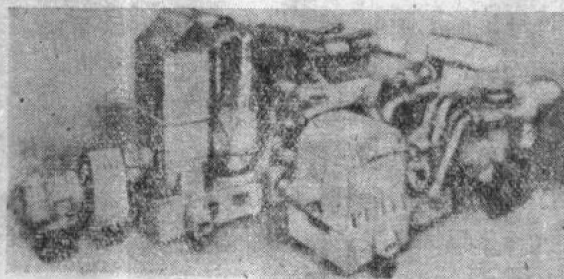


图 11 EL60A型燃气轮机装置的模型

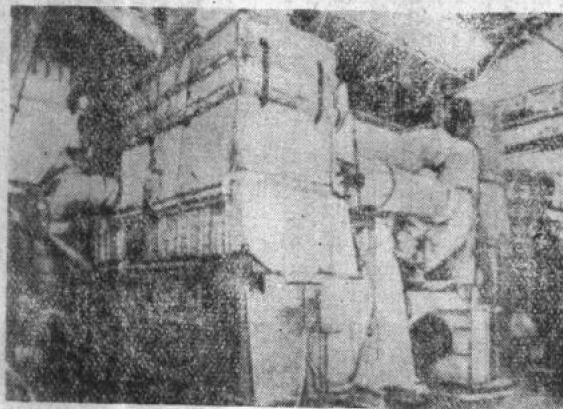


图 12 在試驗台上的EL60A型燃气轮机装置
(从回热加热器端看)

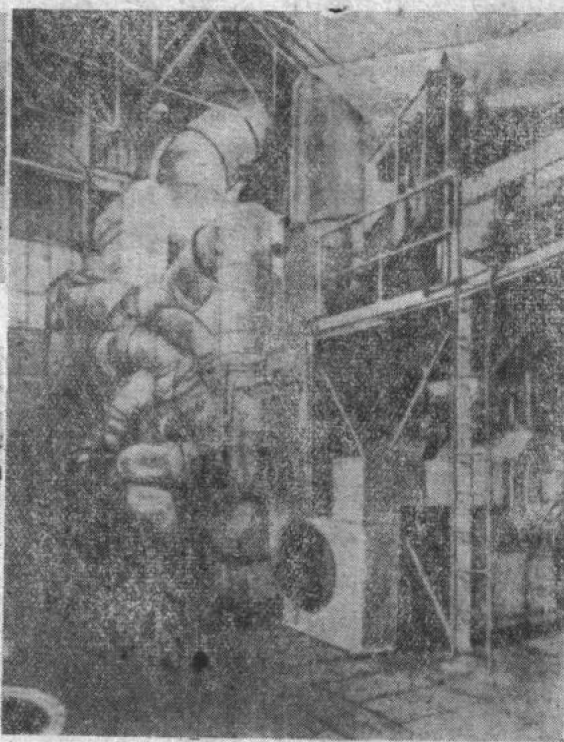


图 13 EL60A型燃气轮机装置
(起动发动机端)

机获得自零到额定功率为止的任何功率，这样在調动艦艇时可便于調节燃气轮机装置。

在正常条件下，EL60A型燃气轮机装置是用操纵杠杆进行調节的，杠杆移到“增速”位置时就打开小型电动机，电动机将燃料打入整个燃烧室，直到燃气轮机到达需要的功率为止。

杠杆移到“减速”位置时产生双重效果：

1. 进入燃气轮机燃烧室的燃料立即减少。在必需急剧降低功率时燃气轮机的节流阀关闭，同时排气阀打开而将空气排入大气，这样就可使燃气轮机的轉速快速变化而毋需改变机组的工况。

2. 进入渦輪压气机组燃烧室的燃料徐徐减少，因此压气机轉子的轉速也徐徐降低。这时节流阀徐徐开启，排气阀相应地关闭，因此燃气轮机轉子的轉速維持不变。

起动 功率为 250 馬力的起动电动机可将驅動压气机用的燃气轮机轉子的轉速带到 1,000 轉/分(毋需向燃烧室进給燃料)，但在正常起动的情况下，轉速到 300 轉/分时已需供給燃料，同时起动发动机要在 2,000 轉/分时才脫开。从冷却状态起动时，燃气轮机装置經 5 分鐘后开始独立运行，15 分鐘后发出全功率。

燃气轮机装置的制造 装置的制造工作原定于 1948 年年底前完成，但在工作过程中发现，制造这种类型的燃气轮机时仅凭原有的經驗是不够的。在制造好多部件时需制訂特殊的工艺，因此阻滯了工作的进度。直到 1949 年，装置中的第一个主要部分——压气机才进行試驗。試驗所得的絕热效率为 86.2%，大大超过了計算值，空气流量也超过了計算值，因此必須修整燃气轮机的結構，即将帶动压气机用的燃气轮机和帶动发电机用

的燃气轮机的第一级取消。这时估计由于这样的修整所引起的循环效率的减小，可由压气机效率的增加而获得补偿。

在焊接燃气轮机的转子时也产生了困难，致使第一台装置直到1951年9月才全部装就后送到试验台上进行试验，亦即直到RM60型燃气轮机装置的试验已证实了轻型燃气轮机可用作主要的船用发动机以后才开始进行试验的。这时笨重的EL60A型装置已成为陈旧的了，显然不能作为以后的船用燃气轮机装置的标准典型。因此决定不再装到“戈特根”舰上进行海洋试验，而仅根据试验台上的试验结果进行研究。

图2所示为发动机最初试验时所得的燃料耗用量曲线。同时也发现在装置工作时产生了很大的损失，装置经过修整后这些损失可以减少，并可使发动机的特性大大改善。1952年经过最终试验后，将装置全部拆卸以检查各部分的状况。

试验结果 虽然这台燃气轮机装置已不能起自己应起的全部作用，并与其他更完善的装置相比，显然已为陈旧，但在试验时获得了许多珍贵的资料，兹分述于下：

1. **一般结论** 所选用的结构系统与汽轮机相似，故使装置的重量增加，即使进行了重大更改使发动机的重量低于50吨后，它的单位重量仍达77公斤/马力。由于转动部分的重量小，气缸毋需冷却并有水平中分面，因此这台燃气轮机装置在船上运行时的维护可说是极为简单的。在这方面只有一个缺点：当空气流发生脉动时，必须将涡轮压气机机组的转速降低，待低于空转的转速后再加上负荷，这一段时间需要5~10分钟。

2. **压气机** 压气机的结构极完善，可用于较新型的装置中。

压气机的效率高而稳定（在压缩比为1.5~4.2的范围内效率为85%），在低转速情况下空气流产生脉动时特性无大的改变。在中间级上装排气阀，以便在低转速时将空气排入大气，才是保证压气机能获得高效率的可靠方法（这个方法较改进叶片机构的方法更好）。

3. **热交换器** 用感应焊锡方法将热交换器的管子装到管板上是一个很可靠的方法。

管子的材料原来是用铝青铜，但管子在工作不久后即产生腐蚀现象，这说明用这种材料来制造热交换器是不适合的。

采用螺旋形钢管后，可使管子的安装位置保持正确。

4. **燃烧室** 装置中最初采用管形燃烧室，这是“雪尔·彼特洛伦”公司为EL60A型

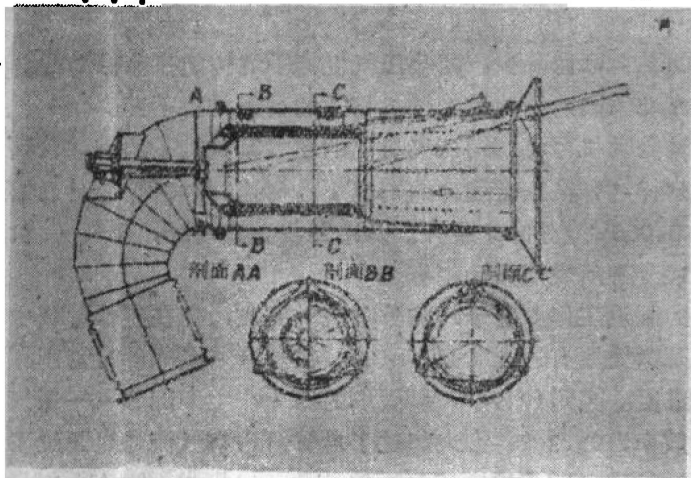


图14 EL60A型燃气轮机装置的燃烧室

装置特制的。这种燃烧室可保证在进气温度为300°时全部燃烧而没有任何不烧透的现象。在整个试验过程中未发现有过热和腐蚀的现象。燃烧室的结构特性见图14所示。转弯处热管是由很多锥形环组成的。

在平衡燃烧室出口的燃气参数时发生了困难（如果不平衡的话，燃气轮机内会产生局部过热）。最感困难的