

第四届国际内燃机会议 论文集



中國科學技術情報研究所

第四屆內燃機國際會議報告

編 出	輯 版	者	中國科學技術情報研究所 北京朝陽門大街117號
印 發	刷 行	者	中國科學技術情報研究所印刷廠
發 行	處	處	中國科學技術情報研究所 北京朝陽門大街117號

工本費：5.67元

1959年6月初版

目 錄

1. 往复式發动机与渦輪机在內燃机工程上的比較…………… (1)
2. 高增压柴油机的發展与經驗…………… (12)
3. 具有布奇式套筒气閥系統的四冲程內燃机…………… (28)
4. 柴油發动机的渦輪增压, 現在情况及將來的發展…………… (42)
5. 一种高增压二冲程輕型柴油机…………… (76)
6. 長崎三菱公司高增压二冲程單作用柴油發动机…………… (88)
7. 燃气輪机在發电站、鍊鋼厂的使用經驗及其运轉与維護
 成本和未來的發展趨勢…………… (112)
8. 8000馬力燃气輪机原型及其在船舶上的应用…………… (147)
9. 日本三菱重工業公司的試驗性燃气輪机…………… (160)
10. 耐長期运轉的船用燃气輪机的發展…………… (195)
11. 在脈冲系統下无扫气泵的二冲程迴綫扫气柴油發动机的渦輪增压問題…………… (225)
12. 迴綫扫气二冲程發动机的廢气渦輪增压及其在船舶与机車上的应用…………… (241)
13. 三井“B & W”型渦輪增压二冲程高速柴油 机…………… (262)
14. 三菱东京“Z C”型高速增压二冲程柴油机…………… (272)
15. 二冲程渦輪增压發动机, 發动机及渦輪增压器之影响及發动机性能特点…………… (284)
16. 交叉扫气的二冲程發动机增压及其在“飛亞特”(Fiat)公司
 柴油机上的应用…………… (300)
17. 增压二冲程發动机的發展工作…………… (321)
18. 增压在船用發动机中的应用…………… (348)
19. 渦輪机輸出功率变化时自由活塞的气体流量的適應問題…………… (360)
20. 燃气輪机中燃燒过程的分析…………… (383)
21. 燃气輪机中使用留余柴油的实际經驗以及防止積灰及銹蝕的附加剂之影响…………… (401)
22. 高功率內燃机的热流量分佈研究…………… (428)
23. 鐵道牽引用柴油机——增压的研究和建議…………… (448)
24. 油輪推進用的渦輪增压柴油机…………… (457)
25. 柴油机与煤气机应用米勒氏(Miller)增压系統的运轉特性…………… (470)
26. 海軍用的封閉循环燃气輪机…………… (483)
27. 續流式与断流式發动机的結合与競爭…………… (494)

往复式发动机与涡轮机在内燃机 工程上的比較

W. Traupel 博士

瑞士联邦工藝学院教授

簡 介

本文按热功学观点按可利用的焓值將柴油机与燃气輪机加以比較。燃气輪机虽具有結構簡單，重量輕，占空間小的优点，但热效率多少仍不及柴油机。但是，由于燃气輪机的維護費用很低，所以運轉成本与柴油机大致相等。燃气輪机在飛機推進上是有決定的优越性。往复式發动机与燃气輪机在广泛的应用範圍內仍各有其發展的机会。

第四屆國際內燃机会議是第一次在往复式發动机以外，增加了燃气輪机的討論。对于这两种类型發动机联合应用的可能性的討論是值得注意的，因此我們想在这篇介紹性的論文中將兩者作一比較。

燃气輪机的發明是与往复式內燃机同样久远。但开始时僅只往复式內燃机得到發展，燃气輪机的發展遇到許多技術上的困难，致使很多專家都認為它們是无法克服的。早在第一次世界大战以前，已經有些建議要將往复式發动机与燃气輪机联合运用，由前者負担在高压高温下的工作过程，后者負担低压的部分。目前广泛采用的渦輪增压，由來也很久了。但只是在本世紀的三十年代里才在較大的範圍內应用，在开始时僅在四冲程發动机中作有限的运用，然后才漸漸增多。近年來，四冲程增压已达到高于大气压力 2.5 倍，同时二冲程增压至 40% 也在技術上臻于完善。二冲程的高增压还找到一种特殊的“动力-燃气”复合方式，即有效功率輸出由渦輪机負担。往复式發动机則作为压力——燃气發生器。然而，虽則这种型式是向着純燃气輪机的發展的一大進步，至今的应用仍較有限。

經過数十年的努力和失敗后。至 1939 年燃气輪机才第一次具有工業应用的型式。自那时起，在所有較主要的工業國家中，都已進行了燃气輪机的發展工作，而用于研究的費用远远超过热力發动机的制造費用，僅在最近因原子动力研究而減少。燃气輪机研究工作中較大部分是直接或間接地与燃料經濟性有关。这实际上也是燃气輪机的一个弱点。而柴油机則从一开始起就在良好的燃料消耗量上有着无可比拟的优点。因此，將燃气輪机与柴油机的工作循环按热功学的基本定律的观点加以比較考察是很有意义的。

常常會听到工程人員談到能量損失，这种說法当然是不很恰当的，因为能量不会損失只会轉換。所以事实上只能意味是能量变成了一种對我們沒有价值的一种形式。称之为“能力的退降” (degradation of energy) 要更正確些。它使我們考慮到一种新的能量平衡概念，其对热能的衡量方法如下：对于能量本身不表示，但按热功学第二定律表示出由这一能量所

能做的功。

根据这个观点，在热功学的研究中加入了“可用焓”这一概念。用 $h-T_0s$ 表示， h 是焓值， T_0 为周围温度， s 为熵。由于能的总量是保持不变的，因此在每一个不可逆的过程中由于 s 增加，可用焓的总和是减少。在这一意义上——也只有在这一意义上，才有可能研究损失的问题。如在这种情况下来研究它的过程，肯定地损失将发生在其他的部分，不和通常的直接能量平衡情况一样。

在热交换器中，热在没有外界损失下从较热的液体传至较冷的液体，按直接的热平衡是没有损失的，因全部热量可以在吸收热的液体中找到。但相反地，从可用焓的观点看来，损失是有的，并因传热给一较低的温度造成的热的退降，损失可能很大——在蒸汽动力装置的冷凝器中，巨量的热传到冷却水，简单地按热平衡来考虑，则装置中的损失是很大。但从可用焓的观点来考虑，冷凝蒸汽的全部热量因温度低已经退降到接近于零了。

工作过程的实际计算一般地能用常用的直接平衡来考虑。但在很多情况下运用可用焓理论会牵涉到一些基本有关的重要概念。因此我们将在这一基础上进行燃气轮机与柴油机的工作过程的热功学比较。

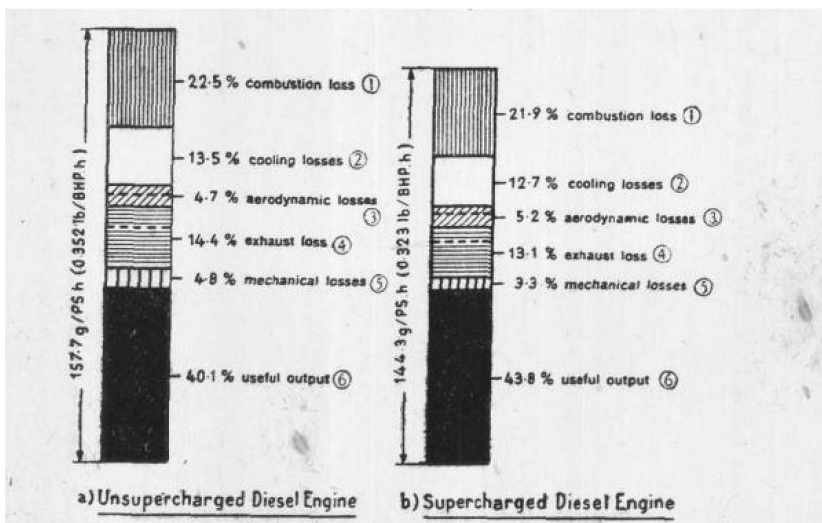


图1 非增压与增压式柴油机按可用焓理论的损失分配图

- ① 燃烧损失
- ② 冷却损失
- ③ 空气动力学损失
- ④ 排气损失
- ⑤ 机械损失
- ⑥ 有用功率输出

(a) 非增压柴油机

(b) 增压柴油机

图1为柴油机循环的损失分配两个例子，(a)是非增压柴油机，(b)是增压柴油机。首先在非增压发动机中，燃烧损失为22.5%，但这并非燃烧不完全；一般地说，当发动机工作情况良好时，可以认为燃烧是差不多完全的。但燃料的化学能只能在一定的温度下转变为热，而因热能也不能全部转化为功，这其间就已发生了一定程度的退降了。这种退降达22.5%，亦即如所有其他的不可逆因素能避免时，发动机仍能达到77.5%的热效率。还有缸壁、活塞、排气管等的冷却损失达13.5%；如按纯粹的能量计算，则例中的这项损失为21%，

但因这一能量的形式是热，原来它就不具备完全的值，因而只相当于13.5%的功的损失。其次是全部空气动力学损失4.7%，它包括下列几项：

排气孔打开时的压力降.....	2.1%
扫气的压力降.....	2.0%
扫气鼓风机的损失.....	0.6%

在四冲程发动机中，因没有扫气鼓风机，所以空气动力学损失要小些。很突出的一点是排气孔开放时压力降的损失很小，因为排气是在相当的高温下进行，故即使在这一过程以后热的能量还是较高的。但是这一热能却一般地因传给外界而全部地退降，即损失为14.4%。在二冲程发动机，这种损失的發生分为两个步骤，第一步是因与超量扫气空气相混合退降4.6%，其余9.8%的热散逸到外界中。

最后，在输入热量中有4.8%的能（10%的指示功）因摩擦而变成热全部退降。因此，在燃料耗量*为157.7克/馬力·小时（0.032磅/制动馬力/小时），其余可用的输出功率为40.1%（但应注意驱动扫气泵所用的功不包括在机械损失内）。

图1b为增压柴油机的相应的损失分配。虽然假定在增压鼓风与发动机之间有中间冷却，但压缩后的温度却比前一例中还要高些（两例的压缩比都是14）。此外，经过冷却的损失较小，因从燃气到缸壁的传热系数的增加较压力的按比例增加为小。两者都造成较高的燃烧温度，因而使燃烧能量的退降减小了，其损失仅为21.9。除冷却损失外，机械损失也较少，而因涡轮机中的额外膨胀的原故，排气损失也较少。但空气动力学损失则比非增压发动机稍大些，其构成如下：

排气孔开放时的压力降	2.0%
扫气压力降	1.4%
充气鼓风机的损失	0.95%
涡轮机中的损失	0.85%

在所举的例子中，有用的输出功率为燃料能量的43.8%，相当于燃料消耗量144.4克/馬力小时（0.323磅/制动馬力·小时）。同时，在两个例子中，假定过量燃烧空气都是一样，即空气比为2。通常增压发动机与相应的非增压发动机相比，过量空气较大，因此热应力减少。

为将这种损失作分析比较，在图2a-c中已将三种不同型燃气轮机作相应的分析，即：

(a) 简单燃气轮机，其最大温度为750°C（1382°F），压力比为6，涡轮机效率90%，压缩机效率87%；

(b) 有热交换器的燃气轮机，最大温度750°C（1382°F），压力比5，涡轮机效率90%，压缩机效率87%，有效热交换为75%；

(c) 有热交换器，中间冷却及中间加热的燃气轮机。最大温度为750°C（1382°F），压力比12，涡轮机效率90%，压缩机效率87%，热交换器效率75%。

此处假定的最高温度750°C（1382°F），从材料强度的观点看，即使在空气动力效率高的长期使用发动机中，目前也是能容许的。但另一方面，在使用重油时，一般地不能采用。因将发生污损与腐蚀问题，这点我们以后要谈到。

* 热效率是按低量值计算，通常采用10,000Kcal/kg=18,000Btu/16=10⁴Kjone/kg

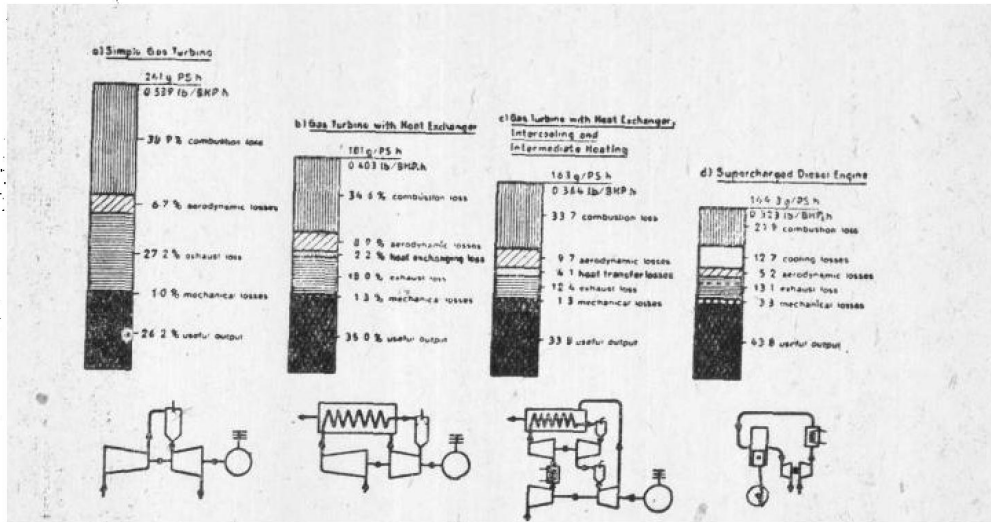


图2 按可用焓的理論，不同型燃气輪机与增压柴油机損失分配的比較图
 (a) 簡單燃气輪机 (b) 有热交换器的燃气輪机 (c) 有热交换器，
 中間冷却与中間加热的燃气輪机 (d) 增压柴油机

对这几种情况的比較，我們把有用輸出繪成一样大小，因此每一个图的全部高度可以直接給出其燃料消耗量（或更准确地是热量率）。每一小格代表不同的損失，因此可以直接量測出在一定的有用輸出下这些損失的絕對量，而数字則表示这些損失所占燃料能量的百分比。

与柴油机相比，可以看出因燃燒發生的較大能量退降是因較低的最大温度造成的退降。因此，热交换器与中間加热的影响是很明顯的，兩者都能減少燃燒損失。还有較明顯的是排气的作功能量損失減少，它在簡單循环时是27.2%增加热交换器后減到18%。热交换器本身的能量退降是輕微的。在有中間冷却时，傳热損失4.1%中只有1.2%發生在热交换器，2.9%是發生在中間冷却器。在往复式發动机中因冷却缸壁而造成的相当大的損失，在燃气輪机中不会發生。这一特点在以下叙述方面尤其值得注意。如在增压式發动机中，燃燒与冷却的全部損失达34.6%，即与燃气輪机循环中（b）的純燃燒損失恰恰相等。这就表明，多数人認為柴油机的高燃燒温度在热功学上的优越性的观点并非絕對正确，因为对冷却的需要，抵消了这一优点。另一方面，燃气輪机的排气損失一般比柴油机大，但却能靠在压缩級之間的中間冷却和热交换（循环“c”）而降低到与柴油机相同的水平。（注意：在循环“c”中，排气損失12.4%还應該加上中間冷却損失2.9%，共計15.3%；采用效率高的热交换器可使之有些降低）。燃气輪机較小的机械損失虽較小，但热交换器却使能量退降有額外的增加。

如果循环“C”在利用了中間冷却、中間加热和热交换后，其效率仍比柴油机低时，顯然最主要的問題是在空气动力学的損失上，按机器的有用輸出功率而言，这种損失比往复式發动机大兩倍。这一結果很重要，因它說明在一台现代化燃气輪机中，对渦輪机械的良好空气动力学特性应給以如何的重視。与此相比，在柴油机中燃气通道的空气动力学設計是很不完善的，往复式發动机的气流型态簡直可以說是很“原始”的。然而，儘管如此，在發动机中的空气动力学損失却只有燃气輪机的一半！其主要原因是它的压缩与膨脹都在同一气缸中發生，而燃气輪机却是在裝置的分开部分發生，而兩部分都会使損失增加。压缩与膨脹在同一

气缸發生实际上几乎是沒有空气动力学損失的。

这些方面說明了燃气輪机將來發展的可能性。如果用水冷却叶片或其他特別暴露的部件，即或能因空气流动率小使空气动力学損失減少，最大温度有較大的提高，也不能算是一种空气动力学的改進。象柴油机中燃燒能量退降上的減低却为相当大的冷却損失所抵消，恰如在柴油机中一样，其缺点通常超过所獲的好处。只有当冷却水中的热量和廢气中的一部分热量能在一个蒸气过程中再得到利用时，这样一种循环才能有相当的优点。然而，采用了蒸气与燃气輪机混合裝置后，簡單化的优点却又牺牲了。不过，考慮到在燃料消耗上的相当大經濟性，这种方案是能采用的。但这立即会引起另一个問題，即是否在柴油机中也能考慮利用冷却水中蒸气热的循环和一部分廢气热的問題。如所周知，許多年前对此已作过試驗了。即所謂“Still”發动机，其工作是很完善的，但因它的复杂性而很不經濟。如現在再采取这一發展方向，无疑地还能設計出一种裝置，其热效率將超过50%。然而它看來还是不会得到認真的重視的。所以，應該考慮的还是水冷却燃气輪机与蒸汽循环的联合裝置的实际全面經濟性的問題

根据上述考慮，顯然燃气輪机要达到柴油机的热效率是困难的，只有牺牲其簡單性才能达到——但航空用燃气輪机却因本身的特殊性而屬于例外。在我們列举的例子中，方案“C”在效率上是接近柴油机的，但不能忽視的是它的結構很复杂，与理想的燃气輪机相差很远，燃气輪机應該是一种比其他类型更簡單和更緊湊的热力机械。我們考慮到只有在輸出功率極大，簡單的方案不易实施时，才值得采用这种方案，亦即，在10,000瓩以上（13,600公制馬力，13,400制動馬力）。这样，它有可能与最大的柴油机作競爭。但在更大部分的功率範圍內燃气輪机要与柴油机并存，由于考慮到裝置的投資和運轉的簡單性，就必需有更簡單的裝置；然而，即使在最有利的情况下，燃气輪机的燃料消耗率也比往复式發动机大得多。

我們很容易体会到，燃气輪机制造家們一开始起就努力設法克服这一困难，但燃气輪机的發展却經常增加了这一困难。所以最好是承認燃气輪机在燃料經濟性上总是要比柴油机差，其优点是在其他的特性方面。这就首先要考虑在燃料消耗无决定重要性的条件下來选择其应用範圍（如作为备用动力裝置，尖峯負荷用裝置或油礦区發电站等等）。然而，即或这些应用比我們假定的要更經常，但其对燃气輪机的限制与在發展研究上的巨大研究工作量相比仍是較大的。因此，决定性的問題是，即使不管更高的燃料耗量，燃气輪机在广泛应用上是否能与柴油机在經濟性方面作競爭。我們考虑的答案是肯定的，主要是因为按目前已有的大量經驗（特別是布朗——包法利裝置）表明，燃气輪机的維護費用比任何种热力机械都低。大約在瑞幣为：0.03—0.1(0.25)分/瓩时（相当于美金：0.075—0.25—(0.025)厘/瓩时）。在小括号中的数字系在“Auris”油輪中試驗性燃气輪机的費用，故比其他工業用燃气輪机高。（美金1厘=1/1000美元）。而柴油机的維護費用約为瑞幣0.5—0.8分/瓩时（美金：1.25—2厘/瓩时）。

在我們更仔細地比較燃气輪机与內燃机的經濟性以前，應該談談我們还未談到的航空用燃气輪机。因为只是在这一方面，燃气輪机引起了一种專家們在各方面努力尋求的革命性改变。儘管它最初看來只是有关軍用飛機的問題，但它很快就被承認是所有高功率飛機的未來的推進裝置。如各位所知，目前已有一定数量的商用飛機已成功地利用燃气輪机作推進裝置。導致这种發展的原因，此处只能描叙一个大概輪廓。

即或飛行速度不高，也有必要用噴氣推進來替代螺旋槳推進。因為它的葉片壽命要求短得多，故其循環的最大溫度能比工業用燃氣輪機高得多（目前一般是 $800-900^{\circ}\text{C} = 1470-1605^{\circ}\text{F}$ ），故它比柴油機優越。同時，在很高的高度飛行時，外界溫度很低，當外界溫度降低 ΔT 時，相當於燃氣輪機循環的最大溫度增加約 $3\Delta T$ 。燃氣輪機循環的效率在實際上是決定於絕對最大溫度與絕對外界溫度的比率。因此，如外界溫度為 $-35^{\circ}\text{C} (-31^{\circ}\text{F})$ ，即 $T_0 = 238^{\circ}\text{K} (428^{\circ}\text{R})$ ；最大溫度為 $800^{\circ}\text{C} (1472^{\circ}\text{F})$ ，即 $T_{\text{最大}} = 1073^{\circ}\text{K} (1931^{\circ}\text{R})$ ，溫度比率為 $T_{\text{最大}}/T_0 = 4.5$ 。在外界溫度為 $15^{\circ}\text{C} (59^{\circ}\text{F})$ ，要达到相同的溫度比就需要最大溫度為 $1025^{\circ}\text{C} (1877^{\circ}\text{F})$ 。工業用燃氣輪機如要达到與航空用燃氣輪一樣優良的熱功學條件，必須要達到這一最大溫度值。

但另一方面，過去用的往復式航空發動機是汽油發動機，其熱效率不如柴油機高，並要求用特別高品級的汽油（柴油機因重量較大而不能成功地用於航空方面）。航空用燃氣輪機因有利的溫度條件易於利用較低級燃料如煤油達到較高的熱效率，故除具有其他優點如較輕和更適於在高空與高速飛行外，在燃料經濟性上也遠超過與它競爭的發動機。

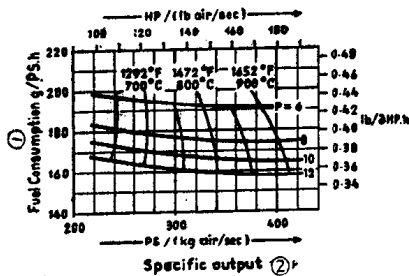


图3 渦輪螺旋槳驅動裝置 (Bristol B.E.25) 的燃料消耗。(大氣條件正常，飛行高度7620公尺=25,000呎)
 ① 燃料消耗：克/馬力·時。
 ② 功率輸出比：馬力/公斤(空氣)/秒

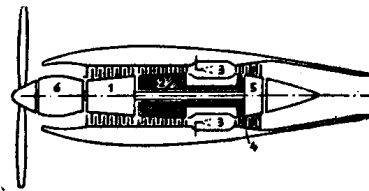


图4 渦輪螺旋槳驅動系統 (Bristol B.E.25) 的混合裝置示意圖
 1. 低壓壓縮機 2. 高壓壓縮機
 3. 燃燒室 4. 高壓渦輪機
 5. 低壓渦輪機 6. 齒輪裝置

图3中是用一台Bristol B.E.25型現代渦輪螺旋槳發動機的例子來說明前叙的各論點。此驅動裝置的基本結構可從圖4中看到。它的渦輪機分成兩個機械上獨立部分（低壓與高壓部分）主要是技術上的考慮；驅動裝置的最適宜安排要求有高的壓力比 p （如圖3， $p = \text{最大壓力}/\text{外界壓力}$ ），這就必須將兩部分分開才能在廣泛的範圍內有優良的調節條件。在7620公尺（25,000呎）飛行時，外界溫度為 $-35^{\circ}\text{C} (-31^{\circ}\text{F})$ ，有關的中等最大溫度為 $725^{\circ}\text{C} (1,335^{\circ}\text{F})$ ，燃料消耗量會達到162克/馬力（0.362磅/制動馬力-小時），在 $825^{\circ}\text{C} (1,520^{\circ}\text{F})$ 甚至低達158克/馬力小時（0.353磅/制動馬力-小時），即達到至今僅柴油機達到的值。當然，這是在不用改進循環，特別是不用熱交換器所獲得的結果。首先是因溫度比率，其次是因優良的空氣動力學設計而獲致的結果。按前面所闡釋的空氣動力學考慮，它在燃氣輪機上的重要性是很明顯的。此外，這台發動機實際重量在無螺旋槳時為0.26公斤/馬力（0.59磅/制動馬力），因此比往復式發動機要輕些。

在作了這些考慮以後，再回到工業用燃氣輪機上，並首先提出一個問題：如假定有非常優良的空氣動力學設計時，可以獲得什麼樣的結果。

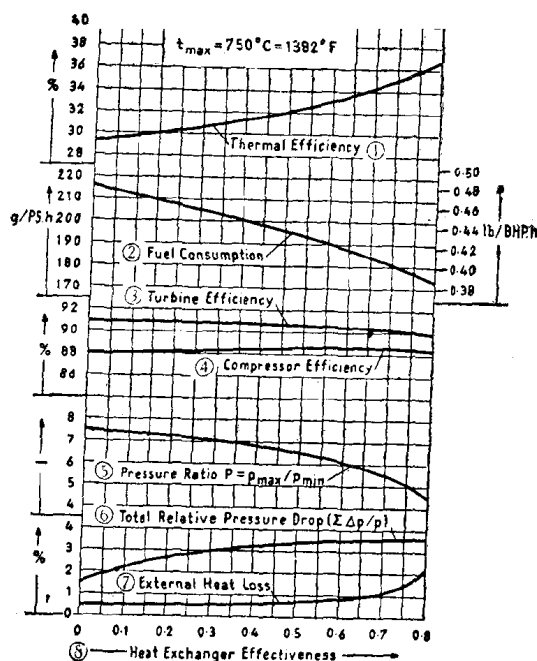


图5 以热交换器的效率为函数的燃气轮机热效率与燃料消耗。(最大温度 $750^{\circ}\text{C} = 1382^{\circ}\text{F}$, 外界温度 $15^{\circ}\text{C} = 59^{\circ}\text{F}$, 涡轮机输出功率机械损失 1%; 其余假定见图解)

- | | |
|--|-------------------------------|
| ①热效率 | ②燃料消耗量 |
| ③涡轮机效率 | ④压缩机效率 |
| ⑤压力比 $P = P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$ | ⑥全部有关的压力降 $(\sum \Delta p/p)$ |
| ⑦外部热损失 | ⑧热交换器效率 |

我们将仅对简单循环加以比较, 其理由如前所述。其过程的唯一改变是增加了热交换器, 其效率为从 0 (无热交换器) 到 0.8 (有大型热交换器)。对于大输出功率, 用复杂而且高级的热功学循环, 则燃气轮机更为有利。图 5 列出计算所根据的不同假设以及热效率与

压 缩 机

级效率	92.5%
污染影响	-0.7%
再热损失	-2.2%
排气损失	-1.1%
等熵效率	88.5%

涡 轮 机

级效率	91.2%
污染影响	-1.2%
再热收益	+1.9%
排气损失	-1.4%
等熵效率	90.5%

燃料消耗。最大温度为 750°C (1382°F)。其中特别重要的是压缩机与涡轮机的等熵效率。为表明选定的方法，我们给定压力比为 6：

此外假定的级效率是很高的，但也不是曾经可靠地量测到的最佳值；污染影响的损失是假定在较狭小的范围，但也不是不合理地小。假定叶片是定期清洗，则每当涡轮级效率下降 2.4 点 (Points) 时应清洗一次，因在整个时期中其平均损失会达到 1.2 点。损失达到 2.4 点 (Points) 时，等于在清洁时的损失增加 27%，其污染程度就是较大了。在压缩机上，此时期中容许的污染程度为 1.4 点 (Points)，即约等于在清洁状态时 19% 的级效率损失。

从图 5 中可以看出，在上述假定条件下，燃气轮机——无热交换器，即无任何过程的改进——在燃料消耗量为 216 克/马力-时 (0.482 磅/制动马力-时)，可以达到热效率 29.3%。这种性能对于一个比任何其他类型结构简单、重量轻、占地小的装置来说是很卓越的。如加入了热交换器 (为不使重量和占地面积增加太大，而限制其效率于 70%)，热效率可达 35%，或燃料消耗为 181 克/马力-时 (0.403 磅/制动马力-时)。

与此相关的传热面积则与 $[\eta/(1-\eta)]^3$ 成比例， η 为热交换器的效能。因此 η 的任何改进只是在传热面积有巨大的增加才能达到。根据这些数据，我们可以将柴油机与燃气轮机的运转成本作如下比较：

柴 油 机					
热效率	燃料消耗	燃料成本	润滑油成本	维护成本	总运转成本
%	克/马力-时 (磅/制动马力-时)	分/瓦时	分/瓦时	分/瓦时	分/瓦时 厘(美金)/瓦时
40	158 (0.353)	3.22	0.16—0.32	0.5—0.8	3.88—4.34 9.70—10.85
45	141 (0.314)	2.87	0.14—0.28	0.5—0.8	3.51—3.95 9.78—9.86

燃 气 轮 机					
热效率	燃料消耗	燃料成本	燃料处理	维护成本	总运转成本
%	克/马力-时 (磅/制动马力-时)	分/瓦时	分/瓦时	分/瓦时	分/瓦时 厘(美金)/瓦时
29.3	216 (0.482)	4.40	0.09	0.03—0.1	4.52—4.59 11.30—11.49
35	181 (0.403)	3.68	0.088	0.03—0.1	3.80—3.87 9.50—9.68

此处燃料价格假定为每噸重油 150 瑞士法郎 (37.5 美元)。润滑油消耗在柴油机假定为燃料成本的 5—10%，而燃气轮机可略而不计。但另一方面，燃气轮机的燃料必需经过处理以抗污染与防腐蝕，其成本假定约为燃料成本的 2%。

比较表明，按上述假定，柴油机与燃气轮机的运转成本系在相同的幅度内。即使最佳的柴油机数据与最劣燃气轮机数据相比，差别仅为 31%。在功率超过 3,000—5,000 瓦，燃气轮

机成本較柴油机低，并且燃气輪机所需的基礎、厂房及交流电机都比較耗費少，也不需要准备水的供应，因此在很多情况下，燃气輪机用于固定發电站有全面經濟性。在实际运用中也顯然如此，虽然其效率不如此处假定的那么有利。

另一方面，至今为止燃气輪机在船舶上的应用范围不大。很多人認為由于对大型、低速兩冲程發动机的增压成功，船用燃气輪机在实际上已沒有發展前途。但是，这种發展虽然还要繼續相当長时期，人們却不能認為燃气輪机永不可能与柴油机作競爭。前面已談到过，在簡單燃气輪机上也能獲得同样低的運轉成本。尽管燃气輪机比柴油机多需要安裝減速与倒駛齒輪，但全部裝置成本并不比柴油机更高，再經過一定的發展时期后肯定还会低些。在很可靠的設計中，包括齒輪裝置在內，其重量比在12—15公斤/馬力（22—55磅/制動馬力）范围内（很大程度上决定于热交换器的尺寸），而直接驅动的二冲程柴油机則为40—50公斤/馬力。在占空間上，連热交换器在內也較小得多。而由于在船上有些空間是不能利用作載貨（如双層底艙）能利用來貯存燃料，所以燃气輪机占空間較小的优点可以利用來增加燃料貯存容積。此外，当因較少的維護工作而使平均停駛時間減短时，裝置的可靠性还需要改進，故裝有燃气輪机的船只能節省大量時間。

渦輪机械的較大的運轉可靠性的优点也是有着某些限制的。无疑地，一台設計优良的渦輪机械比往复式發动机的故障要少些，然而，另一方面，如果真發生故障时；如在海洋航行中，則在燃气輪机要靠用簡單的方法來排除故障，其可能性要少得多。在这一方面，渦輪机又是更不坚实和更敏感的机器。

因此，柴油机与燃气輪机運轉成本的比較，要受到每一特殊情况的实际条件的很大影响。如在世界各地的燃料价格都降低些，則燃气輪机是有利的；但如柴油机的維護費用能大为降低时，柴油机又是更有利了。如果裝置要在低負荷下作較長時間的運轉，則柴油机因其部分負荷时有更佳燃料消耗量而更好些。不过燃气輪机在低負荷时的運轉也不是如大家所想的那么差，因它在很大程度上决定于裝置的設計与佈置。如裝置的热交换器較大，壓縮机在变速下運轉，則其效率曲綫較平。如图6，它只是在半負荷以下一段，其曲綫比柴油机不良些。值得注意的是Bristol B.E.25型渦輪螺旋槳發动机的燃料消耗曲綫（如图3），它在无热交换器时，也表现出有利的部分負荷效率。

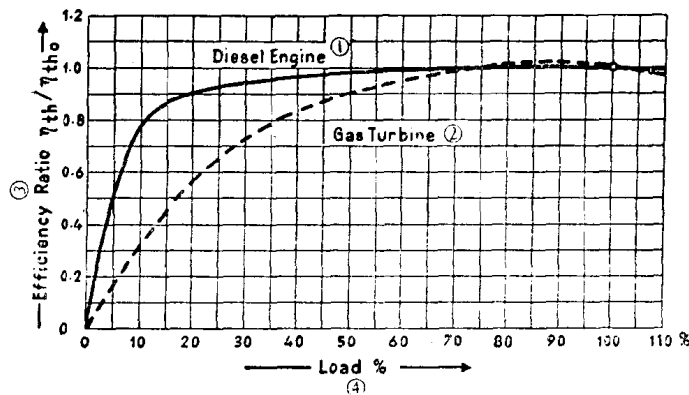


图6 柴油机与燃气輪机在不同負荷时的效率曲綫
（燃气輪机附有热交换器，壓縮机在变速下運轉）
①柴油机；②燃气輪机；③效率比 η_{th}/η_{th0} ；④負荷%。

現在再回到我們計算燃气輪機成本所依據的假定上。我們曾假定它有很優良的效率，但事實也證明是能達到的。假定中的裝置沒有複雜的安排，熱交換器的效率也不很高。（高效率只有在體積巨大或採用并無保證的特別結構才是可能的）。渦輪進口溫度假定為 750°C （ 1382°F ）。這一溫度就目前的材料強度而言是已經能容許作持續運轉的溫度。但另一方面，如採用餉余燃油時，這一溫度又似不可能。但我們理應作如此要求，因為現代化的大型柴油機能有效地燃用這種燃料。故按我們這樣的要求來說，容許的進氣溫度不僅決定於材料在高溫下的穩定性，也決定於葉片積污與腐蝕的考慮，因此不能不將溫度定為約 $600-650^{\circ}\text{C}$ （ $1110-1200^{\circ}\text{F}$ ）。故此，只要是燃燒重油，則從高溫穩定性的觀點看來，最大進口溫度的增高是完全不能利用的。這一點在我們根據假定比較燃气輪機的操作成本時，仍然是所遇到的主要困難。

如所週知，積污與腐蝕是目前眾多的研究所與企業中積極進行研究的工作。在某些特殊情況下曾有過在 800°C （ 1472°F ）下成功地運用重油的實例。雖然積污也與溫度按指數律增加。但在這些情況下，燃料是經過用附加劑處理的。每次所選用的附加劑是與特定的重油中不純物質的化學性質相適應的。但其方法尚不能適用於一般的要求。我們所需要的一種能完全適用的燃料處理方法，它對於任何來源與任何類型的重油，只需作幾次例行的試驗後，即能適用。目前還沒有這種方法。在計算燃气輪機的運轉成本時，我們曾考慮到這種燃料處理的必要性，而假定它相當於2%的燃料成本。照過去的經驗，這一數值還是比較可靠的。

關於這方面，下面的事例是饒有興趣的。所有的瑞士的燃气輪機製造廠家，從一開始起就對渦輪設計的空氣動力學特性方面非常注意，而另一方面對提高最大溫度上却很保守。積污隨溫度升高而增加的事實證明了這一概念的正確性。與此相反的是，認為最大溫度提高比空氣動力學設計更重要。現代的情況很明顯，後一概念只有在結構緊湊和重量輕比效率更重要時，並且是在不必考慮燃燒重油時才是適宜的。

將往復式發動機與燃气輪機所作的這種比較，顯然不僅是非常簡略，而且也不完全。此處我們只需提出這兩種機器在發展時的緊密配合，如渦輪增壓對於柴油機及其發展的日益重要作用。我們也還未考慮到這種機器在很小輸出功率的應用，即摩托車輛。這方面，燃气輪機是在考慮之中，但其缺點是它的热效率比大輸出功率為低。但與汽油發動機相比，燃气輪機的優點是能用較低廉的燃料。此外，我們對於封閉循環燃气輪機這一特殊情況尚未論及。嚴格地說，它並不屬於本屆會議的範圍，因它不屬於內燃機類型。但另一方面，它又屬於燃气輪機。在本屆會議有關內燃機的論題中是包括燃气輪機在內的。對於按開啓循環或封閉循環工作的燃气輪機，熱功學的考慮和原理都是一樣的。但要對封閉循環的經濟性進行比較時，則目前特別缺乏的是有關其維護成本的可靠的資料。燃燒粉末煤的可能性是很有興趣的前景，但這一型發動機顯然應與蒸汽動力裝置作比較，而不應和內燃機作比較。

最後，在今天我們談到任何熱力機械，都不能不考慮到原子動力裝置在將來的發展。對於內燃機製造廠家來說，這是一個實際上關係到他們的存在的問題。因為目前的問題是，在最近或較遠的將來，原子動力裝置是否能完全代替了內燃機。然而正是在這一新的領域中，比舊式的熱力機械更難以判斷其發展方向。這並不是因為需要絕對革命性的發現，以便在很短期內在技術上得到運用；而是因為我們必需處理無數個獨立的發展之間的相互關係。此外，原子技術長期以來被看成是完全軍事性的技術，甚至在今天也不易獲得某些有關的基本資料，而它們對經濟的考慮卻是有決定性的。不僅如此，目前已逐漸明確的是原子動力裝置

愈大愈經濟。因为存在着某些嚴格的无法避免的原因，例如防止輻射綫的保护層所需的重量与成本，即使在小功率裝置时，也不会相应地減低。因此，在功率至少为50,000瓩的原子动力裝置中，才有較良好的經濟前景，而且功率愈增前景愈佳，如到200,000瓩时即如此。另一方面，在小功率范围——目前內燃机的应用范围，现在还很难想象如何使原子动力裝置在經濟上能絕對地“自立”——即我們通常所意味着的經濟性，而不牽涉到軍事性質的附帶考慮（在目前的原子动力在一定程度上仍是如此!）。例如，某些热心的原子动力飛機的支持者就曾着重地声明他們僅是考慮軍用飛機。从这种言論看来，令人最感到沮丧的是看到許多工程师明明地看到他們的全部努力不能为某些能适应人类要求的目的服务。

我希望这些極為簡略的意見能对本屆會議所要促進的意見交流起到一点作用。在往复式發动与渦輪机械的發展上，仍然有一段很長時間和充分的机会要求研究与設計人員辛勤地工作。如本屆會議能給會員們以从事这种工作的鼓舞，并使他們相互之間照人与人的关系親密地接触，它就能完成一件偉大的工作。

高增压柴油机的發展与經驗

西德曼恩公司 (M.A.N., Werk Augsburg, Augsburg, Deutschland)

工程博士苏仁森教授 (Prof. Dr. Ing. E. Soerensen)

內容簡介

在巴黎和海牙的兩次會議中，关于新的高增压柴油机的試驗結果已有报告。在同时，曾經有一些这样發动机安裝在船上并付諸使用。因而取得了大量的实用經驗。此外，对于另外一些尺寸的筒式活塞型的高增压發动机發展程序進行了系統的研究。發动机受到長时期的試驗。关于受到高机械应力的發动机主要部件的情况已獲得了有价值的結果。对于軸流式和徑流式以及不同級数的增压器也進行了比較試驗。此外，又汇集了使用天然气体的運轉資料，証實了將这种燃料用于高增压的效能。

緒言

在巴黎与海牙的會議上已經作过了有关新的高增压柴油机的試驗結果报告。与此同时，有許多的这一类型的發动机采用了这种技術，已經安裝在船上并已投入航運。此外，更多的类型也已制出并作了实际的研究。1956年11月在漢堡的造船技術协会 (Schiffbautechnische Gesellschaft) 年会上已报告了它們在海洋船舶上的实际运用經驗，我們的研究法等也已發表。我在下面所講的研究工作与經驗中將力求不重复，而同时仍給予一个目前高增压發动机的詳細情况。

按設計型式，M.A.N 公司高增压过程的特征可以簡單地描述如下：

- (a) 平均有效制动力高于12公斤/公分² (170磅/吋²)；
- (b) 充气空气压力 (絕對) 高于2公斤/公分² (28磅/吋²)；
- (c) 燃燒压力至少比压缩压力高15公斤/公分² (213磅/吋²)，达到85公斤/公分² (1210磅/吋²)；
- (d) 当燃燒时，气缸中的超量空气 λ 等于或高于2；
- (e) 增压空气的温度冷却到絕热压缩的最后温度以下。

这种新过程的主要特点是气缸的超量空气較高，其結果为：

- (a) 功率的高度集中；
- (b) 發动机有高的功率与經濟性。

迄今为止，除本文中所叙述的發动机外，在实用上还没有能在平均有效制动力15—16公斤/公分² (213—228磅/吋²)，和燃料消耗率为140克/馬力·小时 (0.31磅/馬力·小时) 連續運轉的發动机存在。將連續運轉的高增压發动机与正常的新設計功率相同的柴油机的燃料消耗量相比較，高增压發动机可以節省燃料13—18%。

各种尺寸的發動机

高增压并不限于一种尺寸的發動机和一个速度。除过去發表文件中所叙述过的發動机外，新近曾試驗过其他的高增压类型。目前已有下列發動机的試驗結果：

活塞直徑 公厘/吋	冲程 公厘/吋	發動机速度 轉/分	結構 型式
450/17.7	660/26	250	十字头式
380/15	560/22	360	筒式活塞
300/11.8	450/17.7	400	十字头式
240/9.5	300/11.8	900	筒式活塞
180/7.1	200/7.9	1,500	筒式活塞

至今已有18台第一类型的發動机制成了并裝在海洋輪船中。其可靠性已为数千小时的运转所証明。表中以下三类机型已在試驗台上运转1,000小时以上，一部分截至1956年8月31日时已达数千小时，各主要部件已作过檢查。根据記錄，有关連續运转的可靠性的表現已可作出具体的报导。

十字头式与筒式活塞

高增压并不限于某种發動机設計。第一批發動机是为了裝在商輪中，故設計成十字头式。后来也制成了筒式活塞發動机，其可靠性也得到証实。制出与經過試驗的筒式活塞發動机有直列式与V型。

图1为KV45/66(17.7/26)型十字头式發動机的剖视图。它們在海洋船舶中应用已有数年。在它的許多設計特点中，現僅須談到特別有关机械力范围操縱調節的几点。附图可以看出設計十分簡單的特別高的汽缸头，鑄鋼制的短而坚实的活塞，和十字头与联桿的設計——其頂端不分叉。軸銷为擺式，很緊固地与联桿联在一起。这种裝置就使軸承压力即使在高燃燒压力下也可以減低到正常的数值。

在設計上注意到將油塞区与汽缸隔离的中間部分。使从汽缸襯套上流回的机油和燃燒殘渣不致于和曲軸箱的机油相混合。

將發動机設計成十字头式看起來似与設法使功率高度集中的办法相矛盾。但是，必須指明：高增压可以使任一种設計的制動馬力重量減輕，从而獲得功率的集中。这种可能性既可能在商船的重型發動机中也能在作其他用途的重型發動机中得到应用。

十字头式發動机的主要优点是能够燃用重油。用十字头式的第一个目的是將汽缸与曲軸箱完全分开。筒式活塞式發動机的發展也达到了可以使用重油的程度。但至今为止，在这方面还是十字头式要好得多。图1中的十字头式發動机已在几艘船上成功地燃用了重油。

图2示RV24/30(9.5/11.8)型直列筒式活塞發動机的剖面。因它是用于輪船与機車，必須連續地保持全部功率，故这个类型的發動机在設計上并未利用全部可能性來減輕其重量。曲軸与联桿头的下部也因高燃燒压力而必須加强。在設計联桿头时曾遇到一系列問題，曾詳細地比較过几种不同設計的优缺点。

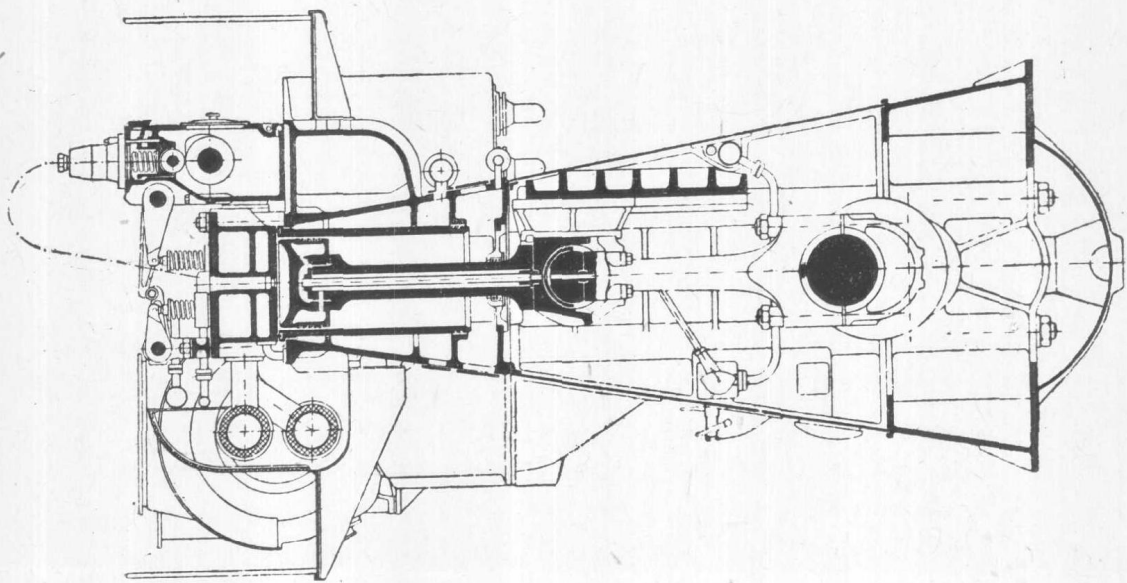


图1 KV45/66 (17.7/26) 型十字头式高压增压发动机的剖面图

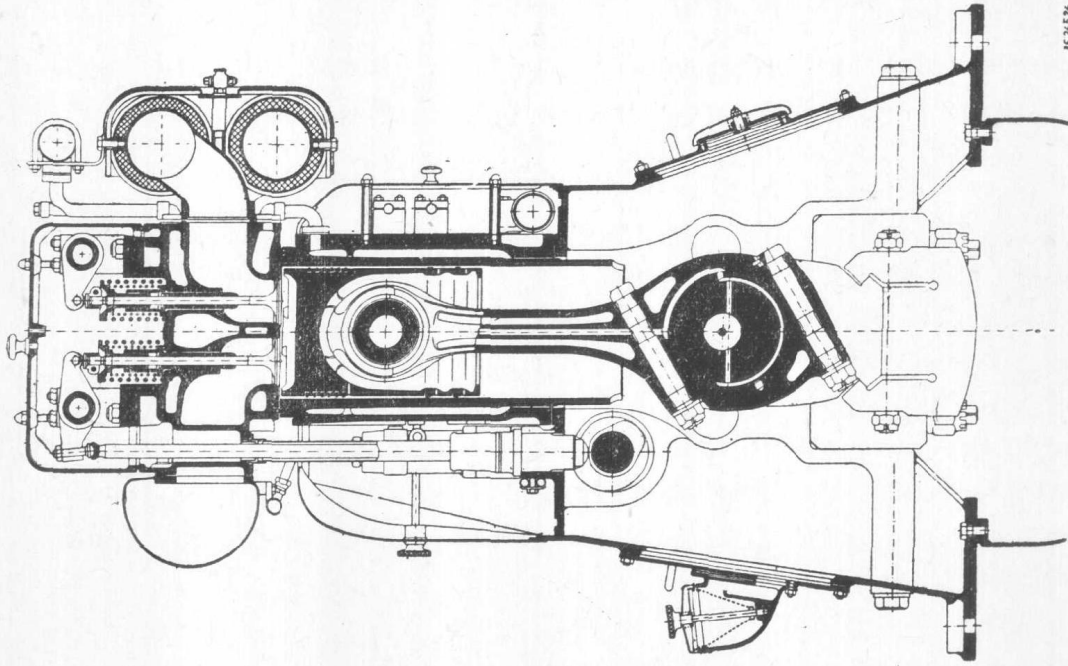


图2 RV24/30 (9.5/11.8) 筒式活塞高压增压发动机的剖面图

3624524