

双工质平行—复合循环热机（一）

（程氏循环热机）

闻 雪 友

〔提要〕 双工质平行—复合循环热机是一种较新的热机，它能达到高效率和高比功。本文对该循环作一综述，涉及循环原理、循环特点、循环分析、各循环比较和应用实例。

主题词：燃气轮机 复合循环

前 言

在燃气轮机中喷注蒸汽以改进效率，增大功率，这种方法并不是全新的。近来，由于对节省燃料和降低投资成本的要求日益突出，重新对这种方法引起兴趣。

国际动力技术公司的程大猷先生于1976~1981年间提出“双工质平行—复合循环热机”发明专利，又称“程氏循环”。

程氏循环发动机有两种分离的工质，每一工质分别增压，然后以一种简单的方式混合、膨胀和回热。该循环本质上是平行联合一个布拉东循环和一个回热朗肯循环系统，以布拉东循环之压比作为运行极限，以朗肯循环之温度为上限，两个循环之排气余热均加以利用。用朗肯循环工质回热是该循环的另一个非常重要的特点。

应当指出，一个发动机同时用两种工质运行并不是全新的概念。程氏循环专利发明的独特之处在于通过适当选择循环参数或部件的独特匹配而达到高效率、高比功的技术，以及确定双工质平行—复合循环的运行极限。

双工质平行—复合循环 热机原理

典型的双工质平行—复合循环热机的原理图见图1。空气经一调节空气压力的节流阀1进入压气机2。如果压气机压比低于12，入口空气温度27℃，则节流阀1也可用作一个汽化器，一部份燃料可从此节流阀中加

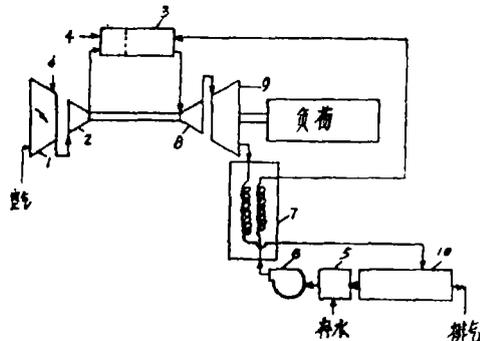


图1 典型的双工质平行—复合循环示意图

入，如图中4'所示。如果压气机压比大于12，又没有专门的冷却，那未在气—燃料混合物被压缩时就会自燃。故而，对高压比，燃料必需在压气机后4处加入。

3 是燃烧室,除了燃烧而外,第一工质也可以用其它方式加热,如太阳能、核能等。

第二种工质(例如水)用泵 6 压到高压,进入热交换器 7,从动力涡轮 9 中排出的排气(蒸汽/燃烧产物的混合物)废热中吸收热量,水被加热成蒸汽。多数情况下是过热蒸汽,湿蒸汽也是可能的。如果从热交换器出口是热水或蒸汽/水的混合物,则在进入燃烧室 3 后亦迅速蒸发成过热蒸汽,通过两种工质的紊流混合,热能从热燃烧产物输入到蒸汽。蒸汽与燃烧产物的混合是在燃烧后进行的,用蒸汽来控制燃烧产物的温度,达到设计的涡轮进口温度值。

然后,双工质混合物进入驱动压气机的涡轮 8 和动力涡轮 9。从动力涡轮出口的排气进入逆流热交换器 7。热交换器的气侧为混合气,其温度从动力涡轮出口的排气温度降至略高于混合气中水的饱和温度的程度。热交换器的液侧,水在压力下从环境温度加热到沸点并蒸发,在水/蒸汽混合区形成湿蒸汽,如果能从排气吸收足够的热量,那末热交换器出口就是过热蒸汽。

从热交换器出来的混合气在开式循环中就排入大气。在闭式循环中则进入冷凝器

10,水从顶部喷头喷淋而下,水滴从混合气中吸收热量,混合气中的水凝结同冷却水一起落入容器底部回收,气体从容器顶部通入大气。

水做适当处理后泵送到热交换器的液侧,一部分水通往冷却塔或其它冷却器,然后在冷凝器中重新回用。

由于循环中有两种工质:水、空气/燃料燃烧产物,每一工质分别增压,继之以简单的混合、膨胀、回热,该循环本质上是平行联合一个布拉东循环和一个回热朗肯循环系统,由于两种工质混合,故输出又叠加在一起,谓之复合。该循环实质上是一种双工质平行一复合回热热机。

从 T-S 图(图 2)上可进一步说明。该图未考虑损失,而且,为解释方便,两种工质在它们各自的布拉东和朗肯循环中分别处理。前已述及,实际上两种工质在循环的一定阶段是平行耦合的,因此虽然图 2 中用两个单独的循环 T-S 图来表示,然而它们却是关联甚密的。

气体工质从状态 1 始经压缩达 2,燃烧及与蒸汽混合使热力状态达 3,然后与蒸汽一起膨胀到 4,排气热量传给另一工质并冷却,理论上回到热力状态 1。

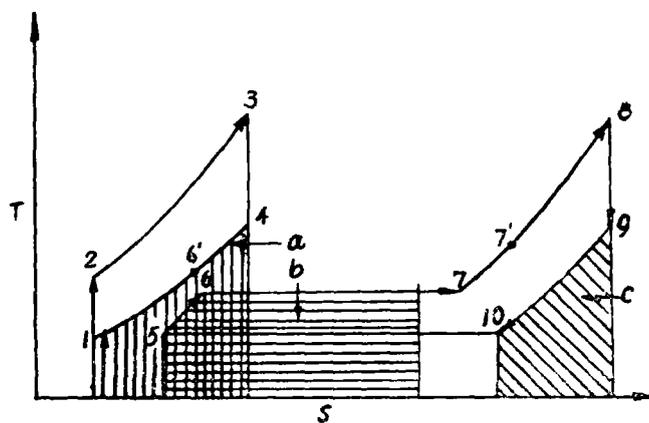


图 2 循环温熵图

液体工质在 5 泵到略高于 2 的压力,温、熵的变化很小。高压液体吸收涡轮排气

的热能达沸点温度 T_b ($T_b < T_7'$), 液体在达到饱和点 7 以前被连续加热,甚或加热到略

低于的 T_3 的过热温度 T_3' , 蒸汽与空气/燃料燃烧产物混合达 T_3 ($T_3 = T_3'$), 并一起膨胀到 T_4 ($T_4 = T_4'$)。蒸汽的排气热量沿9→10的通路传给进入的液体/蒸汽, 构成一个独特的回热蒸汽循环。排气中的蒸汽则从混合气中凝结出来, 返回热力状态5。

与其它循环的区别

程氏循环双工质热机初看起来与燃—蒸联合循环, 回热燃气轮机循环, 喷水燃气轮机等循环有些类同, 因此有必要对它们与程氏循环发动的机差别加以讨论。

《燃—蒸联合循环动力装置》

联合循环仅是在观念上将布拉东和朗肯循环结成一体。两个循环串联运行, 布拉东循环的废热用作热源, 使在一分离的朗肯循环中的水沸腾, 两种工质也没有发生混合, 输出功也是由各循环各自的涡轮产生的。

联合循环中各工质有各自的环路, 有两个各自独立的动力涡轮, 而程氏循环是两种工质混合, 仅需一个动力涡轮。联合循环中的锅炉非常类似于程氏循环中的回热热交换器, 两者在热端和颈部均经受同样的温度限制。然而, 在联合循环中对热交换器的限制更大, 因为联合循环中的水必须加热到足以使在锅炉出口处进入过热蒸汽区。对所讨论的循环则无此要求, 因为即使热交换器出口是湿蒸汽, 也将在燃烧室中变为过热蒸汽。当然, 根据高效率或高比功的要求, 对双工质平行—复合循环发动机也有不同的制约。

《回热燃气轮机》

双工质循环与回热燃气轮机循环在感觉上的类同性在于两者似乎都是从动力涡轮后将废热回收到循环中。但是, 在回热燃气轮机中仅只一种工质, 回热是将压气机排气在进入燃烧室前完成予热。由于涡轮排气温度必须要高于压气机出口温度, 故而回热对发动机的压比有制约, 在高压比的布拉东循环

中采用回热, 其收效减小。

此外, 在回热燃气轮机中, 虽说是单工质, 但却需要复杂的往返管道来实现回热。在双工质循环中没有这样的机械复杂性, 因为回热是在两种工质间进行的, 热交换器易于布置在动力涡轮排气处。

《喷水燃气轮机》

早已认识到燃气轮机中喷水是冷却燃烧室的一种有效方法, 也是一种增加功率或推力的较简单的方法。在早期的航空涡轮喷气发动机上, 用此方法来增加起飞推力。

喷水燃气轮机循环与程氏循环的类同性仅表现在涡轮中均用两种工质。然而, 虽然两者都用同样的两种工质 (水和空气), 但两种循环的设计、运行是完全不同的。在喷水燃气轮机中, 水可从压气机进口或出口喷入, 或为冷却用直接喷入燃烧室, 水没有从循环中回收任何废热。由于水具有大的蒸发潜热, 故作为冷却介质特别有效, 但是因为并没有回热, 故此过程对热效率有不良的或几乎很小的影响。

喷水的另一目的是提供短时推力或功率增量, 发动机不是为带水连续运行设计的, 故而可能加到循环中的水量受压气机失速特性的限制。

双工质平行—复合循环发动机则是设计成以加注蒸汽作连续运行。在双工质循环中, 朗肯循环的流体是工质而不是冷却剂。为达到双工质平行—复合循环发动机的高热效率, 循环参数的适当组合将要求汽/气比随设计点涡轮进口温度的增加而增加, 而在早先的喷水燃气轮机设计中, 涡轮进口温度增加总是导致水/气比降低。

《带喷水和回热器的燃气轮机》

在燃气轮机中喷水的一个更近的应用是用于大气污染控制。水在压气机后喷入气流中, 达饱和点。如果循环中用回热器, 则水在热交换器入口以能使水完全蒸发的适当量 (小于 8%) 喷入, 气—汽混合物在进入燃

烧室前回收排气热量。蒸汽的作用是稀释空气，使燃烧室中的火焰温度较低。燃气轮机 NO_x 的生成与燃烧区内的当地温度有很大的关联，喷水的结果降低了 NO_x 的水平。

蒸汽的比热大致比空气大一倍，水的比热又约是蒸汽的两倍。由此，以水进行热回收（程氏循环即如此）比以汽—气混合物进行热回收远更有效。此外，对于一个用气—汽回热系统的回热燃气轮机，同样具有压比限制，最佳压比一般是6~10。虽然该循环能增加输出，效率也略有改善，但它在输出和效率上的收益远小于程氏循环。

《喷注蒸汽的涡轮热机》

喷注蒸汽的燃气轮机在过去已作过尝试，但在效率方面是失败或失望的，实际上效率相当低，一系列联合循环发动机更有吸引力并已付诸商业使用。

这一事实表明，还没有把这样的循环看作是二个独立热力循环的联接，发动机设计参数和二个循环的结合是独特的。发动机的运行参数互相关联，对最大比功或效率来说是限定在一个狭窄的运行范围内。例如，蒸汽太多会使蒸汽循环很差，因为它没有纯蒸汽循环的高压比，若蒸汽太少，则发动机与回热燃气轮机又很少差别。

早先的分析技巧表明，还没有充分认识到参数间这种相互依存关系，或者是没有找到发动机最佳参数的狭窄范围，仅在比范围内发动机效率达最大。

程氏循环特点

《高热效率》

1. 发动机在两工质间折衷选择压缩功和蒸发潜热，以最小的总功和热耗达到高压、高温、高焓的涡轮进口条件。与燃气轮机中压气机压缩空气的耗功相比，水加压的泵功可忽略。虽然压水耗功不大，但将水变为蒸汽则需大量的能。然而当压力增加时，蒸发潜热就变得较小，例如，在3206 psia时

它为零，当然，那时泵水的功是不能忽略了。与通常的蒸汽轮机相比，蒸汽过热到很高的温度，因而潜热是蒸汽总含能量的一小部分。故而循环沿一实际的低能耗通路运行，达到高压、高能状态，准备膨胀。

2. 在程氏循环中，燃料可以接近理想配比燃烧，这意味着不再像通常燃气轮机的等压过程那样需要大量过量空气来使工质温度控制在容许范围内，也就是说，可节省压缩过量空气的耗功（尤其对高压比发动机）。

3. 空气—燃料燃烧产物与蒸汽通过紊流混合的方法，直接将燃料燃烧的化学能传递给蒸汽。这种方法要比常规的通过锅炉管道传热的效果更好。

由于水比气有更高的传热系数，因此在热交换器中一侧用水比用气更好。

在闭式循环中，排气的冷凝被作为一种传热给回热工质（水）的方法。水温趋于达到其沸点并在回热器中保持该值，其间仍然吸收能量，这导致排气温度和回热温度间有较高的温差，从而达到一个较高的传热比。

4. 回热系统是独特的，仅用朗肯循环回热不很好，仅用高压比的布拉东循环发动机回热也不很经济。换言之，在程氏循环发动机中，有可能实现高效运行。

5. 因有蒸汽可用，故可用它作冷却介质来冷却涡轮而无需用压气机抽气，这进一步减小了压气机的耗功。

6. 在低的涡轮进口温度下，循环的优点消失了，在600℃以下，效率比朗肯循环差。因此，对程氏循环来说涡轮进口温度越高越有效。

《高比功》

7. 由于第二工质为水，在等压下的蒸汽比热至少要比空气—燃料燃烧产物的比热高一倍。换言之，蒸汽作为主工质能比燃气轮机中的空气—燃料燃烧产物做更大的机械功，这使双工质发动机达到高功率密度。

对应于最大效率或最大比功的汽/气比

较大，这使发动机能在达到高效率时有高比功。

《变工况性能良好》

8. 发动机允许压气机和涡轮的质量流量不等，因此变负荷时可用改变蒸汽量的简单方法来控制发动机的输出，保证高压部分以良好的效率运行。

发动机沿一最小能耗通路将两种工质带到高压、高温的运行条件，这种选择能使部分负荷的运行效率较高。

9. 该循环发动机对部件效率影响的敏感性较小，因为它部分回收因循环本身损失而产生的废热。例如，在一个燃气轮机里，当压气机效率从90%降到84%时会使总效率损失超过6%，而在程氏循环里所引起的总效率损失远小于此值。

对程氏循环来说，排气背压的变化也没有引起像通常燃气轮机那样严重的损失。

《改善排放标准》

10. 燃气轮机中 NO_x 的生成与燃烧区内当地的火焰温度有关，因此喷注蒸汽的结果是降低了 NO_x 的水平，改进了污染特性。

《独特的参数匹配》

11. 程氏循环专利发明的独特技术在于适当选择循环参数或部件间的独特匹配来达到高效率或高比功，以及确定循环运行的极限。

对双工质平行一复合循环来说，有四个主要参数。在燃气轮机循环设计中的两个独立参数的是涡轮进口温度和压气机压比，在双工质循环中还有两个参数：热输入率（或空气/燃料比）和蒸汽/空气比。理论上这两个参数的多种组合都是可能的，但是一旦涡轮进口温度设定后，一旦对最大效率或最高比功的特定要求确定后，它们就不能独自规定。实际上，所有的热机循环都不可能设计成既达最高效率又达最大比功。据此，提出了一个狭窄的循环设计参数区，仅在此区域能实现高效率或高效率与高比功间折衷的循环。

图三到图六是一些典型的图线。图三表示蒸汽/空气比与热输入率的关系，它们是在对应于涡轮进口温度的最佳压比下得到的。下边界线是与涡轮进口温度相应的最佳压比下的最高过热度，表示最好效率线相应的蒸汽/空气比。上边界线表示在给定的涡轮进口温度下大致最大的汽/气比值，是一条发动机性能和比功折衷选择的推荐线。

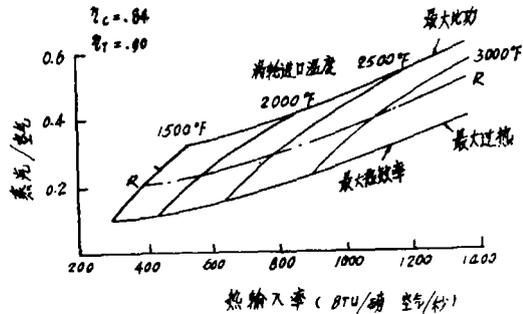


图 3

图4总括地表示了比功的狭窄范围。此时，对一给定的涡轮进口温度，对应最佳压比下相应峰值热效率的热输入率和蒸汽/空气比等参数间的内部关连是确定的。上界则是按最大比功限定的。

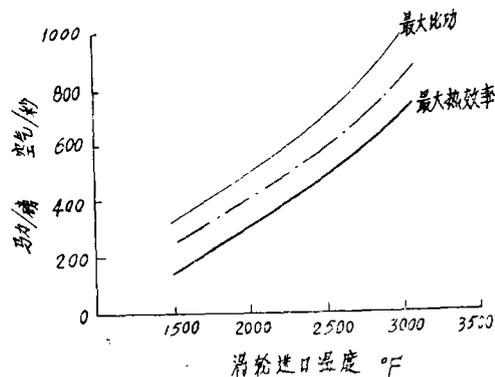


图 4

图5a、5b表示了作为涡轮进口温度函数的热输入率（或空气/燃料比）和压比的覆盖范围，这些区域构成了有一个标准热交换器和合理的部件效率的程氏循环热机所覆盖的循环参数组合。图中E-E是最大效率线，P-P线表示在高效率和高比功间的一种折衷，超出E-E和P-P所包括范围的部

压气机可转导叶环的运动、偏心 和变形对导叶安装角的影响

张春霖

[提要]本文针对可转导叶的安装角偏差问题进行了理论分析。讨论了安装角偏差与可转导叶系统的结构尺寸以及部件刚度之间的关系。导出了安装角偏差的计算公式,并将计算结果与实测值进行了比较。

关键词:压气机 可转导叶

问题的提出

燃气轮机的发展愈来愈要求压气机具有更高的压比。获得高压比的途径,除了航空发动机较普遍地采用双转子结构外,多采用可转导叶机构。我们在试验中发现,可能导叶的某些结构因素,能使安装角偏离名义值。试验表明这种偏差会给压气机的性能带来明显的变

分,表示将来研究出更高效率的部件和更小温度限制的热交换器设计时所可能实现的范

围。图5b左面的纵座标相应于循环用碳氢气体燃料,右面的纵座标用于煤油。

图6表示蒸汽/空气比值的范围,表示有合理部件效率的程氏循环发动机循环参数的一个相容组。 $E-E$ 是最大效率线,接近于下边界。高比功 $P-P$ 线大致是上边界,超过 $E-E$ 和 $P-P$ 的区域则是予见到将来发动机部件效率的改进。

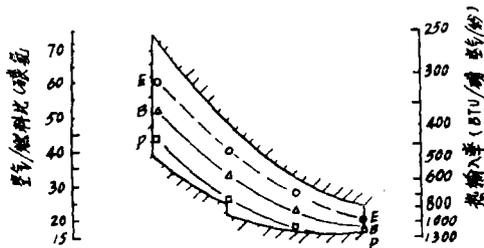


图 5a

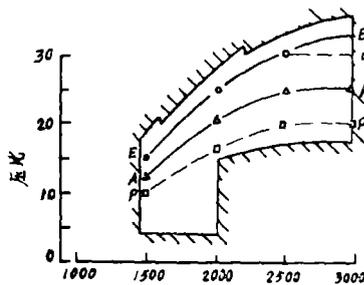


图 5b

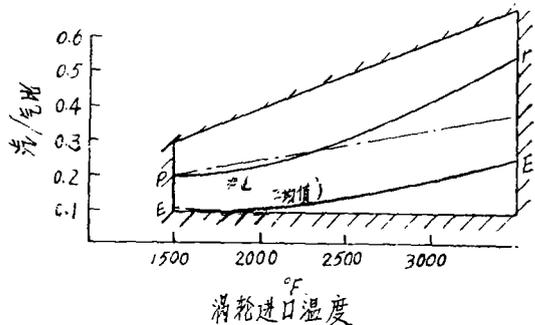


图 6

(未完待续。下期内容:循环简要分析;循环综合比较;应用实例。

JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

No. 4 1986

CONTENTS

1. Li Genshen took part in an oral examination session prior to conferring a master's degree on postgraduates *editorial department* (1)

GAS UTRBINE

2. Dual working fluid parallel-compound cycle engine(Chen's cycle)
..... *Wen Wueyou* (2)

Synopsis

Dual working fluid parallel-compound cycle engine is a relatively new type of thermal engine which is characterized by a high efficiency and enhanced specific power. This paper gives a general review of this cycle, covering such aspects as cycle principle, features and analysis, comparison between cycles, and their application examples.

2. The effect of the movement, eccentricity and deformation of compressor adjustable guide vanes on guide vane setting angles
..... *Zhang Chunlin* (7)

Synopsis

This paper presents a theoretical analysis of the setting angle deviation of adjustable guide vanes. The relationship between the setting angle deviation on the one hand and the adjustable guide vane systems structural dimension and component rigidity on the other hand has been discussed. An equation for calculating setting angle deviation is deduced, and the calculated results are compared with measured ones.

4. Optimization for rotor blades of tandem design for axial flow compressors
..... (13)
5. Selection of startors for marine gas turbines..... *Zhou Zhihao* (18)

Synopsis

Taking the selection of a startor for a certain type of naval gas turbine as an example, this paper focuses on a method for evaluating the required engine start power by using uniform acceleration principle with the dynamic balance condition during engine start-up serving as a calculation basis. The selection of startors which can meet marine use requirements and also