

# 燃气轮机STIG化的研究

邹积国 闻雪友

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔摘要〕 燃气轮机回注蒸汽循环具有高效率、高比功及系统组成的简单性等特点受到广泛注意。能在现有的燃气轮机上实施STIG化是STIG发动机能迅速实用化的重要原因之一。本文讨论了对现有燃气轮机进行STIG化改装中的某些问题,并分析了在工业上采用单轴、双轴和参轴燃气轮机STIG化的工作情况,从中得出了一些结论。

关键词 燃气轮机 复合循环

## 前 言

燃气轮机回注蒸汽(STIG)发动机在80年代中期已进入商用化阶段。目前投入商业运行的STIG机组都是在现有燃气轮机上改装而成,一般用于热电联供。这种改装具有投资少,周期短,可靠性高的优点。因此,将现有的燃气轮机改成STIG发动机的研究具有很大的实际意义。

## 1 单轴燃气轮机的STIG化

单轴燃气轮机的STIG化首先要考虑以下两个因素:发动机允许的最大极限功率和自身的匹配。在发电装置中,单轴燃机以定转速运行,当考虑回注蒸汽增大功率时,发动机的强度问题应受到极大关注。另外,蒸汽的注入,尤其在汽气比较大时,破坏了压气机与涡轮的匹配,压气机压比势必增大,在定转速下压气机工作点移向喘振边界,同时涡轮的容积流量和膨胀比增加,涡轮工作点移向临界。

如果原机的涡轮处于亚临界状态,且压气机有较大的喘振裕度(工作在基本负荷下的燃气轮机、压气机一般都具有较大的喘振裕度),在原机极限功率允许的情况下,改成小汽气比STIG发动机,而不对原机通流部分进行调整是可能实现的。这种情况具有工程实际意义。如在大气温度较高环境下工作的燃气轮机,在基本负荷下偏离设计工况较远,或者由于其它原因功率明显下降,改成STIG热电联供装置,不但可以使原机的功率恢复到ISO状态,热效率明显提高,而且回注蒸汽还可以作为外供热负荷的调节手段,使电厂运行的灵活性增强。整个系统构成简单,投资少,回收快,是很有吸引力的方案。

当原机涡轮设计工况处于临界状态时,除非允许压气机压比有较大幅度的增加,否则,实施STIG化将十分不利。首先讨论压气机增压比不变的情况。由于涡轮临界,其折合流量已达最大,蒸汽的注入必使其涡轮入口温度大幅度下降,其结果随着蒸汽注入量的加大,性能越来越差(图1)。如果允许压气机增压比在一定范围内增加,此时压气

收稿日期 1991-02-27

本文联系人 邹积国 150036

机的空气流量减小、压比升高,使得在一定涡轮入口温度下可以加入相当量的蒸汽而获得较高的性能。但是,此时应该注意处于临界状态下的涡轮是否有能力完成增大后的膨胀比。

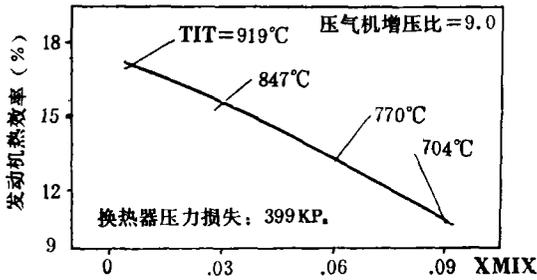


图 1

对于单轴燃气轮机,如果不对原发动机进行调整,要达到最佳汽气比下的回注蒸汽量十分困难。由于发动机极限功率的限制、压气机喘振裕度和涡轮做功能力的限制,要综合解决这些矛盾,意味着发动机有相当的改动量。

首先讨论一台小型单轴燃气轮机。在大气温度 15°C、大气压力 0.1013 MPa、无排

气损失时,发动机的性能参数如下:

- 涡轮入口温度 930°C
- 压气机增压比 9
- 压气机入口空气流量 1.75 kg/s
- 发动机输出功率 223 kW
- 发动机排气温度 520.5°C
- 发动机热效率 18.3%

发动机按定转速运行。

图 2 给出了 STIG 发动机设计点选择的总性能曲线(涡轮定几何)。可见,如不考虑发动机本身的限制条件(极限功率、喘振裕度、涡轮工作状态),STIG 化后确实具有较高的性能。在涡轮入口温度 930°C 时,最佳热效率达 32.3%。但是,由于限制条件存在,发动机仅能在低于最佳效率点以下区域运行。如果发动机的极限功率较大,则 STIG 发动机性能亦较高,在允许的压气机喘振裕度下,涡轮入口温度为 930°C 时,其热效率为 24.9%。但是,随着汽气比的增加,压气机的喘振裕度限制成了主要矛盾,此时,可以通过调整涡轮导向器面积来使压气机的喘振裕度处在合理的范围内。

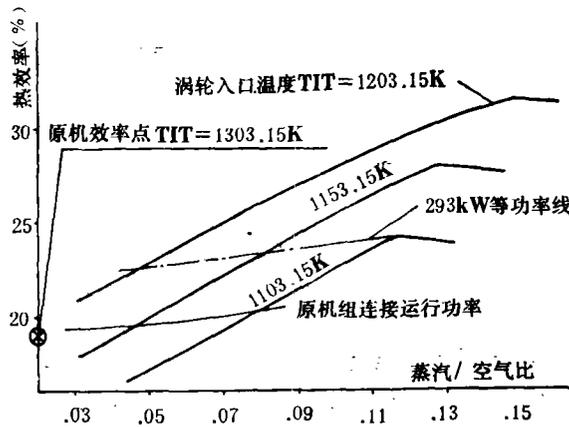


图 2 STIG 发动机设计点选择的总性能曲线

## 2 双轴燃气轮机的 STIG 化

双轴燃气轮机在大气温度 28°C、大气压

力 0.1013 MPa 时,其性能参数如下:

- 涡轮入口温度 815°C
- 压气机增压比 6.30
- 压气机入口空气流量 36.8 kg/s

发动机输出功率 4 400kW

发动机热效率 18.5%

燃气轮机为分轴式。

在发动机的涡轮入口温度、压气机增压比和部件效率不变的情况下，其 STIG 循环的最佳效率为30.9%，而相应于最佳压比下的最佳热效率为31.4%。由此可见，由于发动机压气机的增压比偏离 STIG 最佳压气机压比所造成的热效率下降仅为 1.6%。因此，用这台机组进行 STIG 化可望达到较好的性能。

图 3 给出了在最佳效率下压气机的喘振裕度随高压涡轮第 I 级导向器转角的变化曲

线。当涡轮不变几何时，在相应于最佳效率点的汽气比下，压气机的喘振裕度都很小，发动机不能正常运行。因此，要综合权衡下列诸因素后才能确定涡轮的几何条件：①压气机的喘振裕度；②与动力涡轮的匹配；③热效率和输出功率。分析结果表明，在高压涡轮改动量不大(例如 I 级导向器转角10度)的情况下，能够满足燃气发生器的匹配，但动力涡轮的矛盾突出。由于蒸汽的注入，动力涡轮的膨胀比大幅度增加，而入口折合流量减小，要满足动力涡轮与燃气发生器的匹配，动力涡轮的改动量相当大，甚至要重新设计。

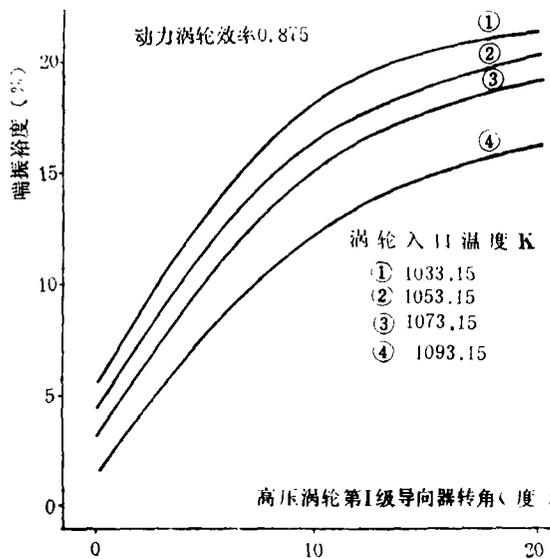


图 3 最大效率下压气机喘振裕度随高压涡轮第 I 级导向器转角的变化曲线 (相对转速1.0)

图4给出了这台燃气轮机STIG化后的总性能曲线。当涡轮入口温度为 800℃ 时，发动机输出功率为 6 960 kW，热效率为26.5%。与原机相比，热效率提高了43%，功率提高了56%，并且涡轮入口温度下降了15℃，有助于提高发动机的寿命。

所讨论的两台单、双轴燃气轮机均属于第一代燃气轮机，其部件效率较低，性能

差。显而易见，性能较差的燃气轮机在改成 STIG 发动机后，其相对收益就越加明显。

另一个较为重要的问题是：涡轮工质变化对涡轮性能的影响，在 STIG 燃气轮机中分析部件匹配时是很重要的。图5和图6给出了在同一涡轮入口条件下不同工质(燃气、蒸汽与燃气的混合气体)的涡轮特性曲线。在同样的膨胀比  $\delta_T$  和相对转速  $\lambda_u$  下，工质变化后，

相应的涡轮折合流量减小。如果要使折合流量保持不变,必须使涡轮的膨胀比增加。这一点在进行双工质发动机的设计过程中很重要。

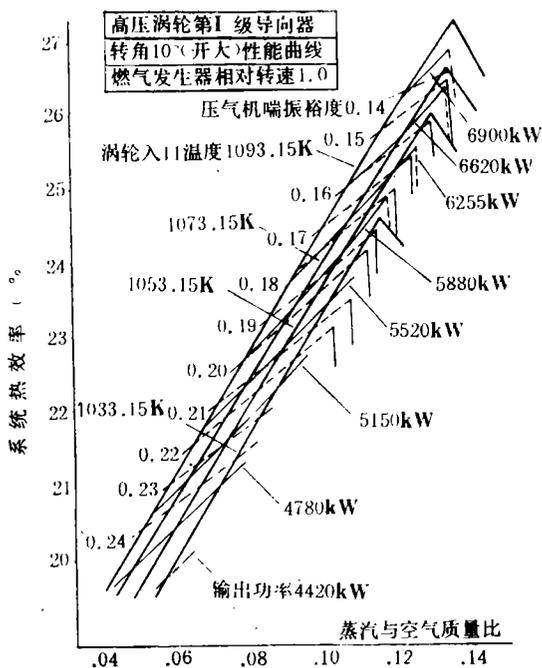


图 4 双轴 STIG 发动机燃气发生器性能曲线

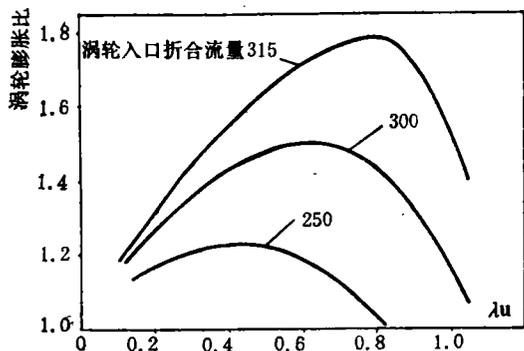


图 5 燃气为工质的涡轮特性曲线

### 3 参轴燃气轮机的STIG化

现在讨论一台在性能上属于第二代的参轴燃气轮机。在大气温度 $27^{\circ}\text{C}$ ,大气压力为

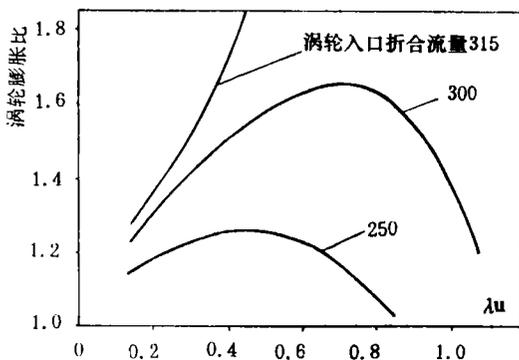


图 6 燃气与蒸汽混合气体为工质的涡轮特性曲线( $X_{\text{MIX}} = 0.128$ )

$0.1013\text{ MPa}$  时,发动机最大连续状态的性能如下:

- 涡轮入口温度  $1052^{\circ}\text{C}$
- 低压压气机入口空气流量  $47.51\text{ kg/s}$
- 发动机总压比  $15.6$
- 发动机排气温度  $481^{\circ}\text{C}$
- 发动机输出功率  $10\ 000\text{ kW}$
- 发动机热效率  $29.8\%$

图7给出了STIG发动机设计点选择中热效率随蒸汽比变化的曲线,最佳蒸汽比下对应的参数为:

- 涡轮入口温度  $1052^{\circ}\text{C}$
- 最佳效率下的蒸汽比  $0.123$
- 发动机输出功率  $16\ 000\text{ kW}$
- 发动机热效率  $41\%$

其热效率和功率比原机相对提高了  $38\%$  和  $61\%$ 。

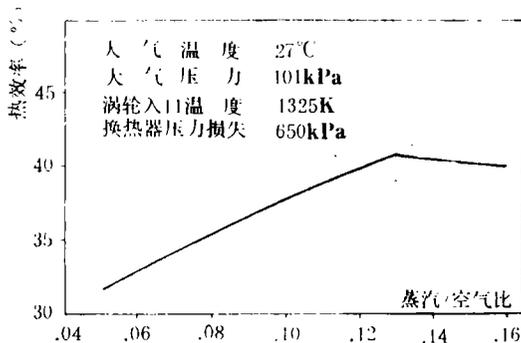


图 7 热效率随蒸汽/空气比变化曲线

叁轴燃气轮机 STIG 化中的重要问题与双轴类似。燃气发生器改动量较小,通过高低压涡轮导向器面积的调整来实现 STIG 发动机的燃气发生器匹配(本方案中,仅低压涡轮第 I 级导向器开大了 3.9 度),动力涡轮则不能正常工作。由于蒸汽注入,使压气机涡轮膨胀比减小,而动力涡轮的膨胀比增加了 25%,折合流量则减少了 13%,因此,动力涡轮需要进行较大改动。由此看来,以动力涡轮输出功的燃气轮机,在改为 STIG 发动机时,动力涡轮与燃气发生器的匹配是主要问题。

在双轴或叁轴 STIG 发动机中,如燃气发生器转速允许调整提高,那么,对 STIG 化最为有利。选择 STIG 设计点时,可使在压气机工作点沿共同工作线向上移动,压气机涡轮略作调整就可能使燃气发生器满足匹配。

为了减小 STIG 化中燃气发生器与动力涡轮的调整工作量,可以考虑采用“多点”加注蒸汽方案。分别从高压涡轮、低压涡轮(也可作为冷却介质)和动力涡轮前注入蒸汽,其结果缓解了或解决了燃气发生器与动力涡轮的匹配矛盾以及较大的蒸汽注入量问题,但收益有所下降。对于双轴 STIG 发动机,从动力涡轮前注入蒸汽,可以从根本上解决匹配问题。若动力涡轮的强度允许,且压气机具有足够的喘振裕度,通过改变燃烧室和动力涡轮前注入蒸汽的比例,不经改动就可能完成 STIG 化的实施,但收益约下降 50%。叁轴燃气轮机采用“多点”加注蒸汽方案时,燃气发生器的调整量将有所增加。图 8 给出了 STIG 发动机的热效率在总注汽量不变的条件下随着非燃烧室部位注汽量增加而变化的情况。可见,效率随之下降(相对于全部蒸汽在燃烧室注入而言)。在动力涡轮前注入,效率最低,但对缓解匹配效果最佳。因此,“多点”注入蒸汽方案,尽管效率增益相对较低,但通过合理的配置有可能

使涡轮部分的改动量趋于最小。

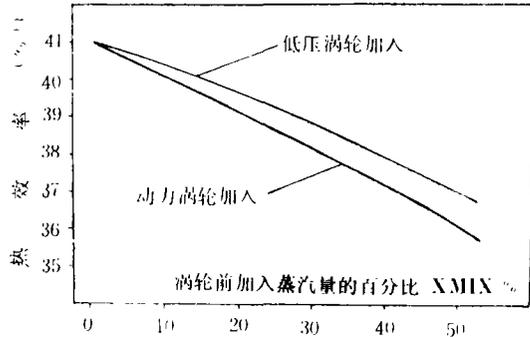


图 8 多点加入的性能比较

#### 4 结 论

1. 单轴燃气轮机改为 STIG 发动机中的主要问题是压气机喘振裕度和极限功率的制约,要获得大回注量、高性能的 STIG 发动机,其改动量将较大。

2. 如果单轴燃气轮机的涡轮处于临界状态,除非压气机具有较大的喘振裕度,涡轮临界没有达到极限,否则不宜改为 STIG 发动机。

3. 双轴或叁轴燃气轮机改为 STIG 发动机的工作中最为突出的问题是动力涡轮与燃气发生器的匹配问题。当追求最佳性能时,动力涡轮的改动量大。

4. 在燃气轮机的 STIG 化中,采用“多点”注入蒸汽方案可以缓解在第 3 点中所述的动力涡轮改动量大的矛盾,但性能收益下降。

5. 涡轮工质变化对涡轮特性的影响不可忽视。

#### 参 考 文 献

- 1 Cheng D Y. Regenerative parallel-compound dual-fluid heat engine. Patent No. 4128994, Dec. 1978
- 2 Cheng D Y. Regenerative parallel-compound dual-fluid heat engine. Continuation of pa-

tent No. 4128994 is a separate patent. patent No. 4248039, Feb. 1981

3 闻雪友, 邹积国. 船用双工质平行一复合循环热机之初探. 轮机协会第三届学会论文, 1986

## A Study of the Extensive Utilization and Adaptation of STIG Cycle in Gas Turbines

Zou Jiguo, Wen Xueyou

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

### Abstract

The STIG cycle, which is characterized by a high efficiency and enhanced specific power together with its system simplicity, has received considerable attention nowadays. This paper presents a practical analysis of the extensive adaptation and utilization of the STIG cycle in some existing single-shaft, double-shaft and triple-shaft gas turbines operating in various industries with some relevant conclusions being drawn.

**Key words:** *gas turbine, compound cycle*

(李乡复 编辑)

(上接第125页)

### 参 考 文 献

1. Baskerville J E. Future propulsion machinery technology for gas turbine powered frigates, destroyers, and cruisers. Naval engineers journal. 1984, 96(2)

2 Cheng D Y. Parallel-compound dual-fluid heat engine. Patent No. 3978661, 1976-09

3 Wen X Y, Zou J G. Application potentiality of parallel compound dual-fluid heat engines on ship. Proceedings of the First International Marine Engineering Conference, Paper 3-2, Shanghai, 1987

(李乡复 编辑)

## A Study of STIG Plants

Wen Xueyou, Jin Jierong, Fu Zheng, Zou Jiguo

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

### Abstract

This paper describes an engine test rig and its components of the first steam injected gas turbine plant developed in China and presents their main design features as well as preliminary performance test results.

**Key words:** *gas turbine, steam injection, power plant*