

舰用燃气轮机的展望

到本世纪八十年代,西方世界主要国家的海军全都采用了航空发动机改型而来的船用燃气轮机。它的发展历史是很复杂的,有许多因素起着作用,有技术上的、也有后勤保障上的因素。此外,英国和美国的航空燃气轮机具有强大的工业基础,也是一个重要的因素。

一、发展的历史

英国皇家海军的工程师们,早在1942年就探讨了航空喷气发动机,经适当改装用于高速海岸巡逻艇的可能。

1947年7月,大约是Parsons的汽轮机用于“透平尼亚”号船50年以后,“盖屈里克”燃气轮机被装于“MGB2009”高速炮艇上,这是世界上第一台船用燃气轮机在海上投入使用。至今,船用燃气轮机已有40多年历史了。

1967年英国皇家海军做出了关键决策:今后的大、中型水面舰艇将以燃气轮机为动力,即执行全燃化政策。美国把燃气轮机应用于战舰上要比英国晚五年左右,但是美国在七十年代初期就接续地在8000吨的“斯普鲁恩斯”级导弹驱逐舰和3500吨的“佩里”级护卫舰采用了LM2500燃气轮机驱动。

另一个海军大国——苏联一直是舰船燃气轮机的最大使用者。1962年下水的“卡新”级驱逐舰就是首次采用全燃推进(CO G A G)的大型水面舰艇。

燃气轮机在使用中的可靠性和利用率在实战使用中已得到了充分证明。1982年历时整整四个月的英阿马岛战争期间,英国共

部署了32艘战舰,其中19艘是全燃推进的舰船投入战斗。这些舰船远离基地8000英里,并在恶劣的气候条件和地理环境下作战,积累了近56000小时的实战运行经验。尽管使用增加了,并且更频繁地用高功率运行,但战时故障却是少得出人意外(战时每1000运行小时发生0.55次故障)。在整个作战期间,没有一艘燃气轮机舰船因主推进装置发生故障而撤出战斗。实战考验证明,燃气轮机舰船适宜于远洋作战,是富有生命力的。

二、目前的状况

舰用燃气轮机经过40多年的研制和应用,目前的情况是:

1. 燃气轮机在战舰的推进领域内已占有一个重要的位置

目前,燃气轮机作为大、中型水面舰艇主要的推进装置已得到各国海军的公认。现在已有三十多个国家的海军采用燃气轮机作为舰艇的推进装置。目前在反潜护卫舰中,燃气轮机已压倒了柴油机动力,而在大、中型驱逐舰和巡洋舰中,燃气轮机的发展又明显超过蒸汽轮机。1961年到1985年世界各国建造的反潜护卫舰以上的舰只中,有51%采用燃气轮机作为动力。

根据粗略统计,仅苏联、美国和英国三国海军目前采用燃气轮机动力的舰艇数目已超过360艘,总功率接近1400万匹马力。

我国海军于1985年已向美国GE公司订购5台LM2500燃气轮机,它们将成对地安装在已在建造中的我国海军的二艘驱逐舰上。这标志着舰用燃气轮机将首次作为我国中型水面舰艇的推进装置。

2. 航机船用化改装是发展船用燃气轮机的主要途径

历史上,英国就曾走过专门的船用燃气轮机研制道路,但后来弃而不用,而“走向航空改型”。美国一开始就走上了航空改装的道路。这是因为航空改装有如下优点:

(1) 航空发动机已结合了由第一流设计部门连续十多年做出的设计努力。

(2) 航空发动机本身已积累了成千上万个运行小时。如英国的“奥林普斯”发动机进行船用化改装时,已在英国空军中服役八年。

(3) 以综合工具大批量生产的航空发动机,按马力的费用计算是比较便宜的。

(4) 结构紧凑。

(5) 起动迅速并允许负荷迅速变化。

(6) 高度的可靠性已得到充分的证实。

(7) 发动机的全部或部分零件实行以换代修是航空应用的通常做法。

在航机船用化改装时需要修改的原因:

(1) 航空发动机主要是在高空工作,该处大气的压力和密度都是较低的。

(2) 它工作的全部时间几乎都是在很清洁的大气中工作。

(3) 航空发动机设计所承受的冲击载荷较船用低得多。

3. 目前船用燃气轮机已进入了第二代机组

随着航空发动机的进展,船用燃气轮机的压比和燃气初温已有了明显提高,部件性能也大为改善,从而使简单循环燃气轮机的热效率从第一代的26%增加到第二代的32%~34%,油耗率从第一代的454~230克/马力小时减小到第二代的180克/马力小时,寿命也从几百小时增加到10,000小时以上。

英国早期研制的“太因”发动机和“奥林普斯”发动机都是第一代发动机。“奥林普

斯”的油耗率是230克/马力小时,寿命超过3000小时。美国的LM2500和英国的“斯贝”SM1A都是第二代发动机,其油耗率为180克/马力小时,寿命接近10000小时。目前已有15个国家(其中包括我国)海军把LM2500用于舰船推进。到1982年底止,已有450多台LM2500发动机交付12个国家海军使用。1982年春完成了船用“斯贝”发动机全部研制后,迄今已有三国5型18艘护卫舰、驱逐舰决定用它装舰。

4. 装舰的系统布置方式

早在七十年代英国国防部就为代替42型驱逐舰的新一级舰船考虑了推进系统。它的推进装置是由4台同样的发动机组成COGAG(燃燃联合)联合装置。从而在部分负荷和最大输出功率之间的任何档功率下,可以使用一台、两台、三台或四台发动机,精确地匹配各种要求的速度,并具有最佳的燃料效率。

与具有加速机组和巡航机组的COGO(燃燃交替)联合装置比较,这种布置方式具有下列优点:

(1) 不需要起动或停止发动机就能得到宽广的经济运行的速度范围。

(2) 改进了后勤支援和维修,并可以使用更简单和更便宜的传动系统。

在英国“无敌号”航空母舰上的4台“奥林普斯”推进装置和美国“斯普鲁恩斯”级驱逐舰上的4台LM2500推进装置的运行经验已充分证明了这种布置的优点,从而使单一机型的COGAG联合装置成为一种富有吸引力的舰用推进装置。

三、趋势和展望

当前国外燃气轮机研究制造部门正在做出巨大努力,来提高舰船用燃气轮机的效率和装置性能,主要是增加船用燃气轮机的

比功率、减少燃料消耗并延长发动机的寿命。下面就部件性能、热力循环和传动布置方面的改进工作作一简单的介绍：

1. 继续稳步地发展大型航空涡轮风扇发动机，提高压比和燃气初温并改进部件性能

把将要出现的航机改进移植到舰船用发动机，第三代简单循环燃气轮机的压比可能达到30，燃气初温可能达到1316℃。估计今后十年内，舰用简单循环燃气轮机的热效率可能从第二代的32%~34%增加到第三代的37%，油耗率达160克/马力小时。

2. 采用朗肯循环能量回收 (RACER) 系统，实行燃蒸并车 (COGAS)

在RACER系统中，一台余热锅炉置于燃气轮机的排气中，产生的蒸汽在汽轮机中做功，提供附加的推进功率。

可行性研究表明，加入蒸汽循环能使以简单循环形式工作的典型的第二代燃气轮机的效率 (32%~34%) 提高到以联合循环形式工作的43%。

美国正在研制用于DDG-51型导弹驱逐舰的RACER系统。该联合循环的热线图示于图1。

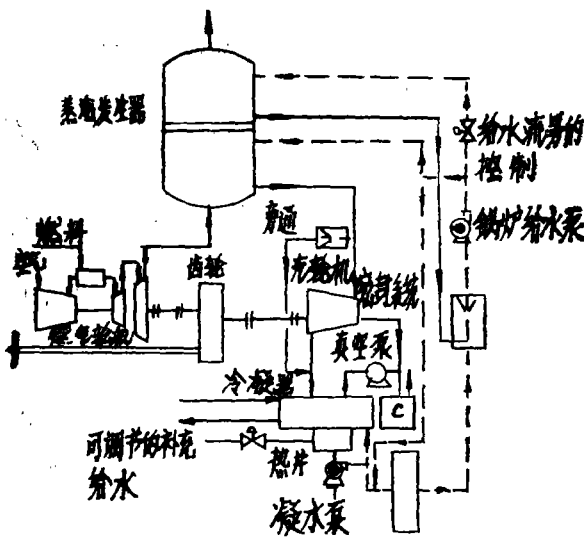


图1 燃蒸联合循环的热线图

研究表明，在以LM2500工作的情况中，由蒸汽循环增加的功率为8000马力。安装在船上，预期每个RACER系统的重量稍低于90吨，并需要占用283立方米的体积。

由热线图可见，系统的复杂性增加了。这意味着增加了出故障的危险，并易受战斗损伤。

3. 利用现有航空改装机改回热或中间冷却——回热循环船用燃气轮机

近年来国外倾向于把现有的简单循环燃气轮机稍作修改，增加回热和中间冷却器来改进发动机的性能。

(1) 回热循环燃气轮机 回热循环线图示于图2。燃气轮机的排气废热通过回热器传给即将进入燃烧室的压缩空气。

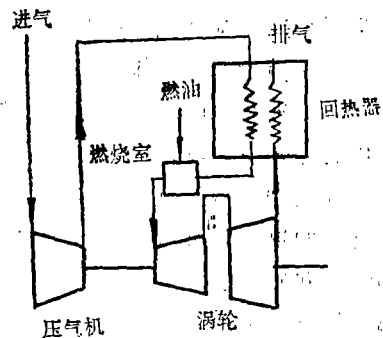


图2 回热循环的线图

研究表明，压比为10或10以下的第一代简单循环船用燃气轮机，如果装回热器，效率可望有较大的提高，预期其热效率可超过第二代简单循环燃气轮机。在部分负荷下油耗的减少更为明显，特别是使用变截面动力涡轮时更是如此。

而对于典型的第二代简单循环燃气轮机如果只装回热器不装中间冷却器，则由于涡轮排气 (燃气) 和压气机排气 (空气) 的温度差很小 (在压比为18时，温度差接近为零)，其热

效率不会有太大改进。

(2) 中间冷却回热循环燃气轮机 这
环在线图示于图 3。

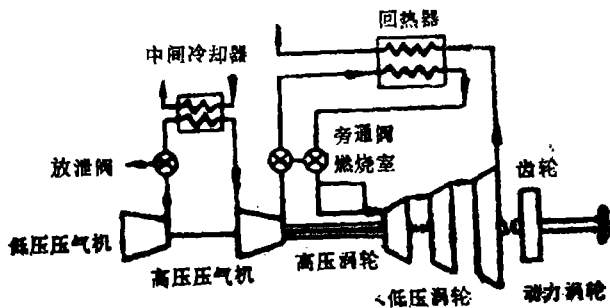


图 3 中间冷却回热循环的线图

在第三代船用燃气轮机的研制中 美国
已选定把船用“斯贝”和 F401 双轴军用涡轮
风扇发动机改装成适于中型水面舰艇推进
用的中间冷却回热的燃气轮机。

采用中间冷却回热循环带来的得益是：

(1) 由于利用了排气(燃气)余热并
对压缩空气进行中间冷却 因此显著增加了
发动机的热效率。可行性研究表明, 额定功
率加大到 22000 千瓦的中间冷却回热式船用
“斯贝”的热效率可从简单循环的 35% 提高
到 43%, 并显著改善了低负荷下的性能。对
船用“斯贝”来说, 从 25% 到 100% 全功率
时, 发动机均将在很低的耗油率下工作(图
4)。部分负荷下的这一高效率尤为可贵,
它使推进装置不需要再设置独立的巡航发动
机。

(2) 由于不需设置独立的巡航发动
机, 再由于增加了比功率, 从而使发动机的
重量和所占空间均有明显减少。

(3) 因为装设了回热器, 涡轮排气的
温度将明显降低, 从而减少了红外线辐射强
度。如果取消了巡航柴油机, 则水下噪音也
将明显降低。

(4) 由于取消了巡航发动机, 则发动
机的维护费用也将相应减少。

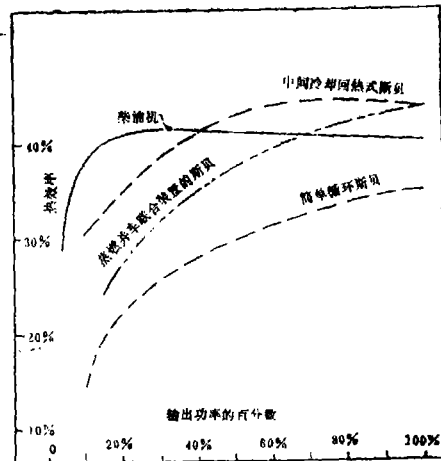


图 4 热效率的比较

但是, 采用中间冷却回热循环, 将需要
考虑下列一些问题:

(1) 需对原来的航机船用化改装发动
机进行修改、拆去低压压气机和高压压气机
后部的一些轴流式级, 而代之以离心式级,
使气流便于流入换热器。

(2) 中间冷却回热循环在技术上的
一个难点是排气热交换器的设计。虽然这些热
交换器在以稳定负荷运转的工业机组中的使
用寿命是可以被接受的, 但是尚无明显证据
表明, 它们能经受得住舰船使用中迅速而又
频繁的负荷变化。

(3) 需要重视回热器的密封问题, 以
便保证传热效果。

4. 采用机械倒车减速齿轮、定距螺旋
桨

目前西方国家几乎全部船用燃气轮机推
进装置均使用了可倒车、可变距螺旋桨。虽
然变距桨能提供平稳的推力变化并可以使用
常规设计的齿轮箱, 但它存在一些严重的缺
点:

(1) 传递功率的上限值为 40000 马
力, 很难设计出超出此极限的变距螺旋桨。

(2) 与定距螺旋桨相比, 轴和轴承的
尺寸和重量都大得多, 而且更昂贵。

(3) 与定距螺旋桨相比,变距桨的水下阻力很大,全功率下增加10%的船体阻力,而在巡航工况下增加6%的阻力,并且它的大修和修理均需在于船坞中进行。

考虑到上述因素,希望在船舱内实现机械倒车。为此苏联在新型的“勇敢”级导弹驱逐舰上已使用了倒车齿轮箱和定距螺旋桨。美国海军也已着手研究在舰用燃气轮机传动装置中采用可倒车的减速齿轮箱,从而使它的舰船可以与苏联战舰一样采用定距螺旋桨。

综上所述,为了提高推进效率、增加传递的功率,采用机械倒车齿轮和定距螺旋桨是动力轮系的发展方向。

5. 采用横向连接的传动方式

对于大、中型水面战舰,传统的做法是布置二个轴系。然而舰船90%的在航时间是在巡航速度以下工作。这时驱动各自螺旋桨的发动机将在很低的负荷下工作,其油耗将急剧增加。为此,美国已着手研究在燃气轮机与螺旋桨之间的功率传递中提供一种带有电力的横向交叉连接。在低负荷下,通过功

率传递,可使一台发动机同时驱动二个螺旋桨,从而使燃料消耗显著减少。

这种带有电力的横向交叉连接的机械传动,对于燃气轮机推进的舰船具有很高的吸引力。

通过上述努力,预期2000年时可用于舰船的新型燃气轮机,与目前的LM2500相比,将有以下特点:

- (1) 单机功率的空气流量减少35%,从而使比功率显著增加。
- (2) 发动机热效率为43%,油耗率接近136克/马力小时。
- (3) 低功率下油耗保持不变,从而不需要单独设置巡航发动机。
- (4) 维护和监控可保证翻修期超过15000小时。
- (5) 推进系统由于可用能量的回收、齿轮和轴系技术的改进,从而使推进装置总的重量和体积均明显下降。

(吉桂明 编译)

(上接第4页)

本文作者对南航王立成老师的热情指导表示感谢。

参 考 文 献

1. 王保国,吴仲华:含分流叶栅或串列叶栅的 S_1 流面上可压缩流动矩阵解。工程热物理学报,5卷1期,1984.2.
2. Katsanis: Fortran program for calculating velocities on a Blade-to-Blade stream surface of a Tandem Blade Turbomachine, NASA TND 5044, 1969.
3. Katsanis: Revised Fortran program for calculating velocities and streamlines on a Blade-to-Blade stream surface of a turbomachine, NASA TM X-1764, 1969.
4. J. F. Thompson, F. C. Thams, and C. W. Mastin: Automatic Numerical Generation of Body-Fitted Curvilinear coordinate system for Fields containing Any Number of Arbitrary Two-Dimensional Bodies. Journal of computational physics, 15, 299, (1974).
5. 惠兆森:串列叶栅绕流计算及试验研究,硕士论文,1986.1.