

退役航空涡扇发动机地面应用的有效途径之一 ——再热燃气——蒸汽联合循环

吴浩山 陶月

(哈尔滨七〇三研究所)

[摘要] 本文探讨以退役航空涡扇发动机作为燃气发生器,内函的燃气与外函的空气相掺混,经再热燃烧室加热后进入动力涡轮作功,并且应用余热锅炉回收一部分排气余热,产生蒸汽,驱动汽轮机作功所组成的再热燃气——蒸汽联合循环。通过计算实例说明该循环具有输出功率大,循环效率具有相当大的提高等特点。

关键词 航空涡扇发动机 再热燃气——蒸汽联合循环 余热利用

分类号 V235.13 TK115

1 引言

航空涡扇发动机具有性能好,工艺成熟等优点而成为现代航空发动机的主要型式。每年这类航空发动机退役的数目不小。而退役发动机经检修后一般都还存有相当长的地面运行寿命,若将它们改装后用于地面发电,并使它们循环效率达到用户可接受的水平,无疑,这将是一笔可观的财富。

航空涡扇发动机,尤其是类似于 Spey 型(风扇级数较多,内、外函掺混排气)的发动机,要进行地面改装,一般需要对低压部分作较大的改动。首先,要考虑去掉产生推力的外函道部分;同时必须对低压涡轮作相应地改动,以便使得低压轴功率匹配,但是,对于航空退役机组,发动机本身要作较大的改动是不经济的。因为机型品种多,批量不大,而且退役机组的实际技术状态与新机有着一定的差距。

在内、外函掺混排气的航空涡扇发动机后配置再热燃烧室,安装动力涡轮驱动发电机,这种再热循环形式,能大大增加功率输出,同时也提高了动力涡轮的排气温度,可应用余热锅炉回收一部分热量,产生蒸汽带动汽轮机作功。该形式的再热燃气——蒸汽联合循环的功率和效率均较可观,而技术实施的难度也不大。

本文以 Spey512—5W 航空涡扇发动机为例,进行了各种方案的计算和分析。

2 再热循环分析

退役航空涡扇发动机用于地面发电,要达到输出功率大、效率高,关键问题是外函部分空气的处理。最简便的处理方法是外函部分放空,仅靠内函气体参加作功(图1)。直接用原航机作为燃气发生器,对原结构几乎不改动。由于外函部分气体未参加作功,耗去了

收稿日期 1994—12—12 修改定稿 1995—04—16

低压涡轮大量的功,所以循环效率较低。

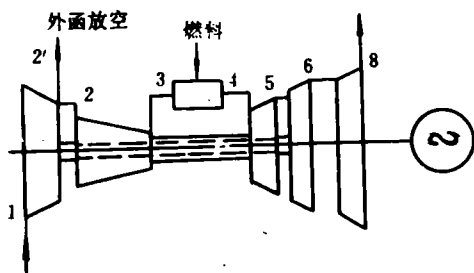


图1 燃气轮机简单循环

内、外函气体掺混后进入再热燃烧室燃烧,提高了动力涡轮的进口温度,使动力涡轮的焓降增大,流量也增加,便增大了输出功。

内函空气经主燃烧室燃烧后,还剩有大量氧气,加上未参加燃烧的外函空气,所以再热燃烧室的效率还比较高。文献[1]中介绍再热燃烧室将会带来3%左右的压力损失。

计算表明,由于排气温度随再热温度上升而增高,使排气余热损失增大。结果是:如果不利用此余热,循环效率比外函直接排入大气的简单循环效率还要低(图2)。

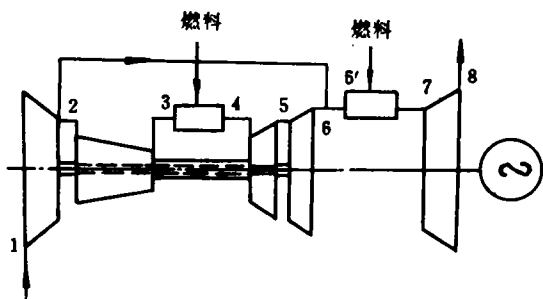


图2 燃气轮机再热循环

在动力涡轮后安装余热锅炉,回收一部分热量来产生蒸汽,驱动汽轮机,则可提高循环效率,增大功率输出(图3)。此再热燃气——蒸汽联合循环过程的T-S图见图4。

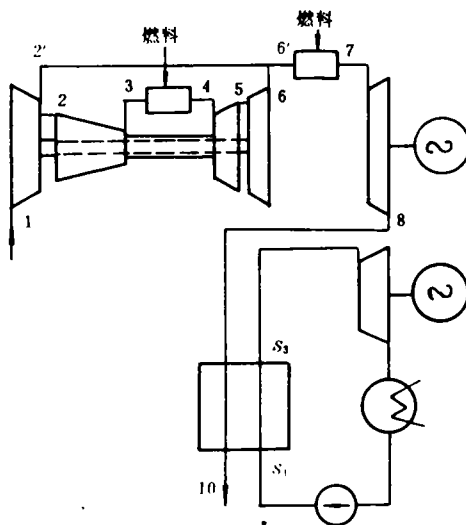


图3 再热燃气——蒸汽联合循环

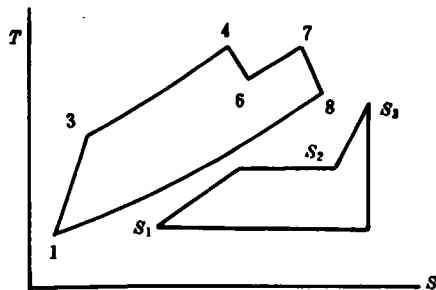


图4 再热燃气——蒸汽联合循环T-S图

再热可提高联合循环的热效率。因为再热一方面使燃气轮机输出功增大,同时排气温度也提高,使汽轮机输出功明显增大。尽管再热多消耗了一些燃料,但这部分的燃料增加了总输出功。而且总输出功的增加比燃料的增加要快。所以,联合循环热效率随再热温度上升而提高。

关于再热后的燃气温度选取,除性能因素外,还应考虑到材料和强度的因素。按文献[2],由于受到燃气发生器低压涡轮末级动叶、动力涡轮叶片和轮盘材料强度及冷却方式的限制,再热温度一般要比燃气初温低出139~167℃。

目前,国外动力涡轮进口温度已达较高的水平。例如:LM2500为857℃(1130K),LM6000为832℃(1105K)^[3]。

3 计算实例

以退役的Spey512—5W航空涡扇发动机作为燃气发生器,分别计算了几种不同的循环。

Spey512—5W发动机为双转子,内、外函混合排气形式。它的主要参数为:

总压比	20.75
低压压气机压比	2.60
高压压气机压比	7.98
总流量	93 kg/s
内函空气流量	55 kg/s
外函空气流量	38 kg/s
燃气初温	1094 ℃
内函燃气排气温度	602 ℃
低压压气机出口温度	139.7 ℃

3.1 简单循环(图1)

直接用航空发动机作为燃气发生器,增加排气装置,把外函气体排至大气。对原发动机可不作任何改动。由于仅内函部分的空气经过燃烧室燃烧后排至动力涡轮做功,所以输出功和循环效率均较低。

计算结果为:

输出功率:	$N = 7995 \text{ kW}$
循环效率:	$\eta = 19.7 \%$

3.2 内、外函气体掺混后进入动力涡轮做功(图2)

原发动机本身不作改动,直接用作燃气发生器。虽然内、外函气体掺混后进入动力涡轮的燃气温度下降了172.1℃,但是,燃气流量增加了约70%,因此,输出功率、循环功率都有所提高。

计算结果为:

输出功率:	$N = 10887 \text{ kW}$
循环效率:	$\eta = 26.8 \%$

3.3 再热燃气——蒸汽联合循环(图3)

内、外函气体掺混后进入再热燃烧室加热后,在动力涡轮中膨胀做功,接着排入余热锅炉产生蒸汽驱动汽轮机做功。

余热锅炉热力过程见图5。

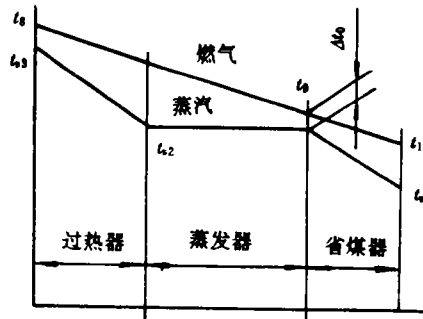


图5 余热锅炉热力过程

- t_0 —燃气轮机排气温度
- $t_{0.2}$ —余热锅炉出口过热蒸汽温度
- Δt_0 —离开蒸发器的燃气温度和蒸发器中的饱和温度之差
- t_1 —余热锅炉给水终温
- $t_{1.0}$ —余热锅炉出口燃气温度
- $t_{1.1}$ —余热锅炉蒸发器出口燃气温度

余热锅炉参数的选择与燃气轮机排气温度、汽轮机要求的进口蒸汽参数等因素有关。本文选取中压汽轮机的进口蒸汽参数:压力3.43 MPa、温度435℃。

余热锅炉的节点温差 Δt_0 越小,回收的热量就越多。但是, Δt_0 选取得过小,会使换热面积过大,同时也增加了排气的阻力,影响燃气轮机的出力。本文选取30℃。

t_1 选得越低,联合循环效率越高。该值的选取与燃料成份有关。 t_1 选得过低会使通过省煤器的燃气温度低于其露点温度,造成换热器的腐蚀。本文选取 $t_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

从图6能够看到:再热燃气—蒸汽联合循环总输出功率和循环效率均随再热温度上升而增加。国内生产的动力涡轮进气温度已

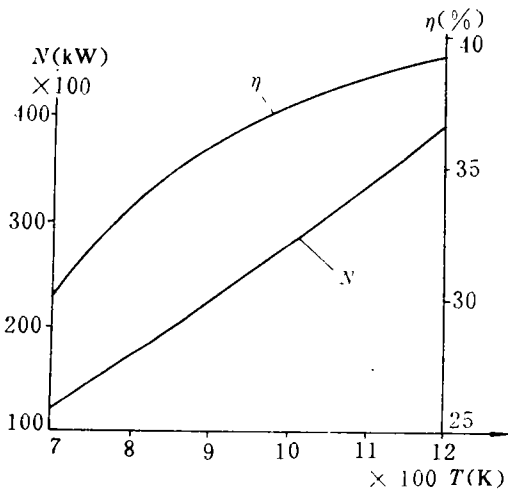


图 6 再热燃气—蒸汽联合循环总输出功率 $N(\text{kW})$ 和循环效率 η 随再热温度的变化曲线

燃气轮机输出功率 $N_g = 14\ 071\ \text{kW}$
 汽轮机输出功率 $N_s = 10\ 918\ \text{kW}$
 总输出功率 $N = 24\ 989\ \text{kW}$
 循环效率 $\eta = 36.5\%$

再热燃气—蒸汽联合循环在结构设计中有两个问题需认真加以考虑。

1) 设计一个大尺寸、耐高温的再热燃烧室。由于外函气体的加入,使流量增加较多,为确保再热燃烧室燃烧效率高、压力损失小,须控制流速过大,故使径向尺寸较大。同时由于增加内、外函气体掺混段和再热燃烧室,燃气轮机的轴向长度也将增加。再热温度的高低直接影响装置的循环效率和功率,所以要考虑应用耐高温材料和对再热燃烧室与燃气接触部位采取一定的冷却方式。

2) 需设计一台耐高温、小膨胀比、大流量及长寿命的动力涡轮。

循环计算中的各截面参数列于表 1。

超过 677°C ($950\ \text{K}$)。本文选定再热温度为 677°C ,得到的计算结果如下:

表 1 循环计算各截面参数表

部件	名称	符号	单位	数值		
				简单循环	掺混循环	燃蒸联合循环
1	低压压气机进口温度	T_1	K	300	300	300
2	低压压气机进口压力	P_1	MPa	0.0998	0.0998	0.0998
3	低压压气机进口流量	G_{k1}	kg/s	93	93	93
4	低压压气机效率	E_{k1}	/	0.834	0.834	0.834
5	高压压气机进口温度	T_2	K	413	413	413
6	高压压气机进口压力	P_2	MPa	0.26	0.26	0.26
7	高压压气机进口流量	G_{k2}	kg/s	55	55	55
8	高压压气机效率	E_{k2}	/	0.846	0.846	0.846
9	高压压气机出口温度	T_3	K	787	787	787
10	高压压气机出口压力	P_3	MPa	2.07	2.07	2.07
11	高压涡轮进口温度	T_4	K	1367	1367	1367

续表 1

部 件	名 称	符 号	单 位	数 值		
				简单循环	掺混循环	燃蒸联合循环
12	高压涡轮进口压力	P_4	MPa	1.99	1.99	1.99
13	高压涡轮效率	E_{11}	/	0.863	0.863	0.863
14	低压涡轮进口温度	T_5	K	1040	1040	1040
15	低压涡轮进口压力	P_5	MPa	0.51	0.51	0.51
16	低压涡轮效率	E_{12}	/	0.894	0.894	0.894
17	低压涡轮出口温度	T_6	K	875	875	875
18	低压涡轮出口压力	P_6	MPa	0.231	0.231	0.231
19	混合器进口流量	G_m	kg/s	/	93.95	93.95
20	混合器出口温度	T_v	K	/	702.882	702.882
21	混合器出口压力	P_v	MPa	/	0.227	0.227
22	再热燃烧室出口温度	T_7	K	/	/	950
23	再热燃烧室出口压力	P_7	MPa	/	/	0.218
24	动力涡轮出口温度	T_8	K	785	591	806
25	动力涡轮出口压力	P_8	MPa	0.107	0.107	0.109
26	动力涡轮效率	E_{13}	/	0.88	0.88	0.88
27	动力涡轮输出功率	N_e	kW	7995	10887	14071
28	燃气轮机装置油耗率	B_e	/	0.424	0.311	0.406
29	燃气轮机装置热效率	E_e	/	19.7%	26.8%	20.6%
30	余热锅炉蒸发器出口烟气温度	T_9	K	/	/	544
31	余热锅炉出口烟气温度	T_{10}	K	/	/	493
32	过热蒸汽压力	P_{s2}	MPa	/	/	3.5
33	过热蒸汽温度	T_{s3}	K	/	/	708
34	汽轮机乏汽压力	P_{s4}	MPa	/	/	0.008
35	余热锅炉给水温度	T_{s1}	K	/	/	423
36	余热锅炉节点温差	ΔT_0	K	/	/	30
37	蒸汽透平效率	E_s	/	/	/	0.8
38	蒸汽流量	G_s	kg/s	/	/	12.37
39	蒸汽透平输出功率	N_s	kW	/	/	10918
40	联合循环热效率	E	/	/	/	36.5%

4 结论

退役的航空涡扇发动机作为燃气发生器组成的再热燃气—蒸汽联合循环,具有设备投资省、输出功率大、循环效率尚可等特点。在缺电、运煤困难的油田地区,是一种现实、可行的技术方案。

参 考 文 献

- 1 Rice L G. The combined reheat gas turbine/steam turbine cycle. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1980, January, 35~49
- 2 Rice L G. Thermodynamic evaluation of gas turbine cogeneration cycles, Part I—Complex Cycle Analysis. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 1987, January, 8~15
- 3 Gas Turbine World, The 1992~93 Handbook
- 4 沈炳正, 黄稀程. 燃气轮机装置. 第2版, 机械工业出版社, 1991年5月
- 5 焦树建. 常规的燃气—蒸汽联合循环热效率的关系式. 燃气轮机技术, 1991(3)

作者简介:吴浩山,男,38岁,工程师,哈尔滨七〇三研究所无锡分部314室主任助理兼涡轮组组长。主要参加“斯贝”MK202航空涡扇发动机船用化改装及“斯贝”MK512航空退役机组改装地面发电工作,在该项目中主要从事动力涡轮结构设计和强度计算工作。该两型机组均已完成性能调试。还参加了多座小火电站、柴油机发电厂的汽机间、除氧间总体布置,系统设计及柴油机发电厂总体布置工作。

通讯处:214151 无锡市117信箱

太 阳 能 电 站

据《Modern Power Systems》1994年3月号报道,以色列The Weizzmann Institute of Science(魏茨曼科学研究所)向中国提供先进的开发太阳能的专门技术。

来自中国能源研究机构的一些科学家早已在以色列的该研究所学习。

中国科学家感兴趣的一个领域是基于太阳能电池的系统,它能利用由各个光谱带集聚的太阳能。

另一项要开发的技术是以化学燃料的形式储存并输送捕获到的太阳能。

计划在西藏建造10座太阳能电站,该省许多乡村没有电力。

正在制定建造中国第一座太阳能电站的计划。

(学牛 供稿)

国外热电冷三联产的现状和前景—热电联产工程系列报告之四=The Present Status and Future Prospects of Overseas Engineering Projects for the Triple Production and Supply of Thermal Energy, Electricity and Refrigeration—the Fourth in a Series of Technical Reports on Cogeneration Systems [刊,中]/Qiang Guofang(Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -259-265

On the basis of three earlier reports by the present author this paper focuses on some engineering projects for the triple production and supply of process steam, electricity and refrigeration, a new technology evolving from conventional cogeneration systems. The basic concepts and some specific application examples of the said technology are presented along with a general review of the related research work currently conducted in China and a brief assessment of the development prospects. Key words: cogeneration, district heating and refrigeration, heat pump, absorption refrigerator

退役航空涡扇发动机地面应用的有效途径之一——再热燃气—蒸汽联合循环=Combined Gas-steam Turbine Reheat Cycle—an Effective Approach for the Ground Application of Out-of-commission Aero-turbofan Engines[刊,中]/Wu Haoshan, Tao Yue (Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -266-271

Discussed in this paper is a combined gas-steam turbine reheat cycle with an out-of-commission aero-turbofan engine serving as the gas generator. The combustion gas of an inner duct after mingling with the air of an outer duct is heated in a reheat combustor and then enters a power turbine to do expansion work. With the help of a waste-heat boiler a certain portion of the gas turbine exhaust gas heat is recovered to produce steam for driving a steam turbine, rendering useful power. Through specific examples and calculations it is shown that the said cycle features high power output and significantly enhanced cycle efficiency. Key words: aero-turbofan engine, combined gas-steam turbine reheat cycle, waste-heat utilization

离心叶轮内部三元流场计算在实际工程中的应用=The Calculation of the Inner Three-dimensional Flow Field of a Centrifugal Turbine Disc and Its Engineering Applications[刊,中]/Ma Shengyuan, Zhao Yousheng, Liu Yuliang (Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -272-278

By use of two kinds of relative stream surface theory and a finite differential method the mathematical solution of a centrifugal turbine disc inner flow field has been attained. Based on the calculation results the authors have identified the deficiency of the original turbine disc structural design and calculated the inner flow field of the newly improved turbine disc. Key words: flow field, numerical computation, turbine disc modification

EC-301 旋转叶轮整体结构应力分析=The Stress Analysis of a Rotating Turbine Disc Integral Structure[刊,中]/Zhou Chuanyue, Wang Xu(Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -279-282

By way of the three-dimensional stress analysis of EC-301 closed type centrifugal turbine disc integral structure the authors have come up with a novel method of integral structure stress analysis for a rotating turbine disc by using general finite element analysis procedures and temperature-treated interference fit. Also given is a method for the identification of slackening out and the determination of a suitable interference fit between the turbine disc and the shaft. Key words: turbine disc, finite element, stress analysis

燃气轮机余热锅炉的设计特点=Design Features of Waste-heat Recovery Boilers for Gas Turbines[刊,中]/Chen Qiduo, Liu Changhe, Zhao Shiguang, Chen Bin, Sun Hongyu. (Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -283-290