

航空发动机用于地面燃煤差速联合循环的性能研究*

清华大学 钊 丽** 徐向东 朱为民

【摘要】 提出一种新型燃煤联合循环发电技术—载热部分气化燃煤联合循环(CGCC), 在这一系统中采用了由航机改型的 FT- 8 燃气轮机。本文通过对燃气轮机系统性能的分析, 采用模块化建模方法, 全面地分析了燃气轮机在系统中设计工况和变工况下的工作情况, 认为 FT- 8 燃气轮机用于 CGCC 系统具有很大优越性。

主题词: 联合 循环 燃气轮机 性能分析
分类号: U263. 11

1 差速循环床联合循环系统简介

在现有各类燃煤联合循环发电技术中, 最有代表性的 3 种技术虽然各有特点但又都面临

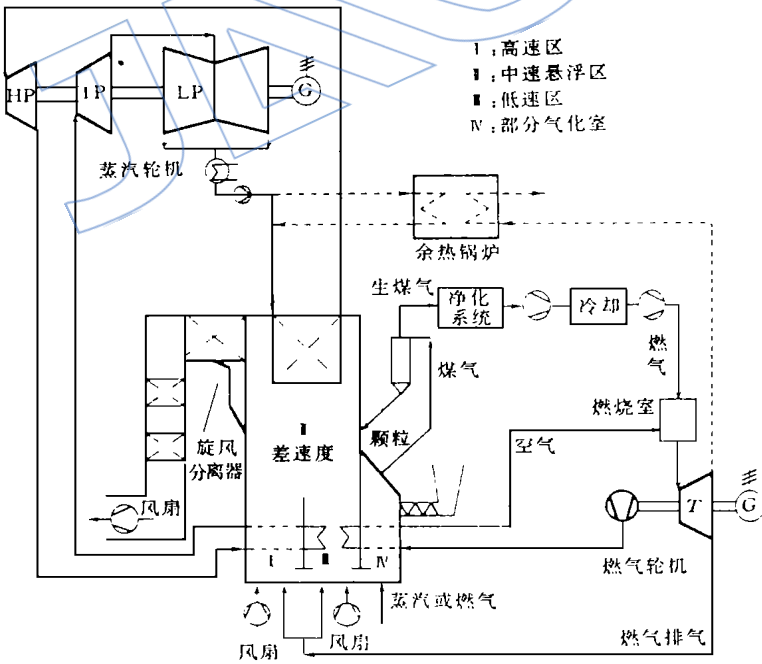


图 1 载热部分气化联合循环系统图

各自的难题^[1]。在此基础上,本文提出了一种易于实现的新型燃煤联合循环发电技术:载热部分气化燃煤联合循环技术(CGCC)。使用该技术,可使我国电站的供电效率由现有的 30%(50 – 100MW)和 32%(125MW)提高到 36.5% – 40%,具有巨大的经济效益。图 1 为 CGCC 系统简图。这一新的联合循环技术与现有技术相比,其特点不仅在于该系统简单可靠、技术难度小、研制费用低,而且由于采用了带有煤气发生器的差速内循环流化床锅炉(DFB),使燃料粒度适应性大,且可使煤中的挥发物在接近常压下产生高热值煤气,易于实现低温下分离净化;同时,在循环床低速区内设置压缩空气加热器,减轻了磨损。由于是管内加热,使燃气轮机工质无尘,对燃气轮机叶片的寿命有很大好处。归纳起来,这是一种综合差速循环床、空气加热、部分气化补燃的煤联合循环技术;而且,是一个大汽轮机,小燃气轮机的循环系统,对于燃气轮机工业尚不成熟的中国,这类技术有较好的现实性。

2 FT- 8 燃气轮机在 CGCC 系统中的应用

FT- 8 燃气轮机系统由一个双轴轴流式燃气发生器来驱动一个 3 级动力透平;低压压气机共有 8 级,其入口带有可调静叶;7 级的高压压气机采用 JT 8D 原装压气机。整个燃烧室 9 个单独的燃料调节阀;燃烧系统可改造成能够燃烧中、低热值煤气。一个新设计的空气冷却高压透平用来驱动高压压气机。两级低压透平也进行了重新设计。新的 4 级 FT- 8 动力透平用来输出电力。设计比较研究认为,4 级的动力透平是性能、尺寸、重量的最佳组合。FT- 8 的设计工况数据在表 1 中给出。

在载热部分气化燃煤联合循环(CGCC)系统各部件选择^[3]过程中,我们进行分析、对比及论证。在现有国内外燃气轮机中,我们认为 FT- 8 及 PG6531B 性能优越,适合于 CGCC 系统。另外,有一批退役 FT- 8 航机未达寿命极限,尚可应用于地面,故开发 FT- 8 燃机在联合循环系统中的应用具有极大的实用性和经济性。

表 1 燃气轮机数据

参数 (单位)	功率输出 (kW)	压 比	T_3 ($^{\circ}\text{C}$)	压气机空气 流量(kg/s)	冷却空气 百分比(%)	压气机 效率	透平 效率	燃烧室 效率	燃烧室压 力损失(%)	透平出口压 力损失(%)	透平排气 温度($^{\circ}\text{C}$)
PG6531B	36600	11.7	1104	136.4	6.3	0.87	0.885	0.97	1.0	4.7	543.0
FT- 8	24840	20.3	1160	85.4	13.5	0.89	0.92	0.97	1.0	4.7	443.0

对于 CGCC 系统,采用不同工艺而得到两种不同煤气 A、B 作为工质,其中 A 以蒸汽作为气化介质,煤气 B 以煤气作为气化介质。地面燃气轮机 PG6531B 的有关数据列在表 1 中。对比计算结果见表 2(其中环境温度为 15 $^{\circ}\text{C}$,环境压力为 101.3 kPa,高压、中压蒸汽温度为 550.0 $^{\circ}\text{C}$,高压蒸汽压力为 13.4 MPa,中压蒸汽压力为 2.3 MPa,烟气温度为 143.0 $^{\circ}\text{C}$)。

在部分负荷下,随着系统给煤量的减少,燃气轮机燃用的煤气量随之减少,透平入口温度降低,透平的膨胀比也随之降低,见图 2。由于两串联透平膨胀比在总的膨胀比降低时,高压透平膨胀比下降比低压透平膨胀比慢,则在部分负荷下,高压透平膨胀比下降慢使它所带动的压气机转速下降慢,低压透平膨胀比下降快使它所带动的压气机转速下降快。由于 FT- 8 燃气轮机是由套轴双转子航机改装得到的,因此与平行双轴燃气轮机一样,存在高、低压压气机转差的问题。压气机产生喘振的原因是工作不协调所致,若保持任何工况下的 n_L/n_H (低压压气

机转速与高压压气机的转速比) 不变, 则随着转速的降低, 低压压气机的平衡运行线靠向喘振

表2 计算结果

方 案	1	2	3	4	5	6	7	8
压气机压比	11.7	11.7	11.7	11.7	20.3	20.3	20.3	20.3
空气流量(kg/s)	136.4	136.4	136.4	136.4	85.4	85.4	85.4	85.4
煤气	A	A	B	B	A	A	B	B
空气埋管出口温度(℃)	700	600	700	600	700	600	700	600
空气埋管压力损失(%)	18.0	13.5	18.0	13.5	15.7	12.0	15.7	12.0
透平入口燃气温度(℃)	1104	1104	1104	1104	1160	1160	1160	1160
煤气流量(kg/s)	3.569	4.417	1.681	2.081	2.374	2.866	1.129	1.361
透平出口温度(℃)	537.0	565.8	570.9	563.2	469.9	465.5	467.1	462.1
透平出口流量(kg/s)	138.60	139.50	136.72	137.12	86.92	87.41	85.69	85.91
进差速床透平排气(kg/s)	138.60	139.50	80.89	105.09	86.92	87.41	55.19	69.42
进余热锅炉排气(kg/s)	0.0	0.0	55.83	32.03	0.0	0.0	30.49	16.49
耗煤量(kg/s)	24.85	30.76	10.22	12.65	16.53	19.953	6.863	8.271
输入能量(kW)	531510	657857	218535	270584	353519	426790	146800	176910
燃机输出功率(kW)	31736	33740	31057	32877	22592	23700	21998	22976
汽机输出功率(kW)	179100	223515	61725	81149	118470	144291	41268	52598
辅机功率								
煤气压缩机(kW)	- 3022	- 3740	- 2518	- 3117	- 2541	- 3068	- 2150	- 2592
鼓风机(kW)	- 721	- 1079	0	0	- 507	- 719	0	0
引风机(kW)	- 2366	- 2931	- 776	- 1007	- 1576	- 1903	- 529	- 657
净功率输出(kW)	204727	249506	89488	109902	136438	162301	60586	72325
供电效率(%)	38.52	37.93	40.95	40.62	38.59	38.03	41.27	40.88

边界, 高压压气机的平衡运行线靠向堵塞工况, 最后导致低压压气机喘振而不能运行。产生这种不协调现象的原因是压气机各级圆周速度变化相同, 而容积流量即轴向速度变化不同所致。因此, 变工况下, 若转速下降时, 转差 n_L/n_H 增加, 能协调压气机的工作。从图2中可以看出, 随着转速的下降, 高压转子与低压转子的转差随给煤量减少而增大。由此可知, 在CGCC系统中, 采用高压比的FT- 8 燃机, 可以协调压气机的工作, 使其在很大范围内正常运行而不喘振。计算中发现, 只有当负荷极低时(小于30%), 工作点才接近低压压气机的喘振工况。

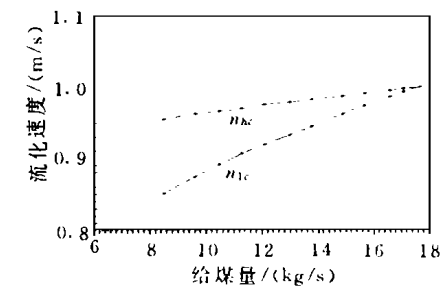


图2 高、低压压气机 n_c^* 随给煤量的变化

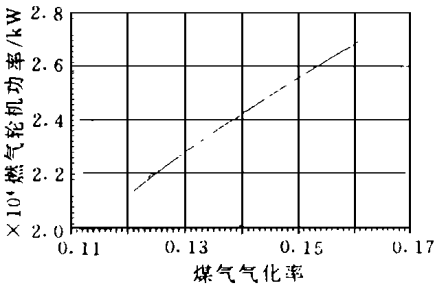


图3 燃气轮机功率随气化率的变化

随着气化份额的提高,煤气量即燃气轮机燃烧室的燃料量随之增加,则压气机的转速、压比均升高,燃气轮机作功量增大,见图 3。当给煤量减少时,燃气轮机燃料量减少,压气机空气流量、压比、转速等均降低,透平入口燃气温度、出口温度等均降低,但由于空气流量的减少,其温度的降低减缓。对于同一给煤量,气化率较高的情况下,各参数均较气化率低的情况高。

空气埋管温度也是影响系统性能的一个重要因素。设计工况下的空气埋管温度为 970 K,作为对比,另设定空气埋管温度为 920 K。空气埋管温度降低,相当于压缩空气在锅炉中的吸热量减少,因而在同样的燃料量下,透平进口燃气温度较低,因而其转速、压比都比同样的给煤量下空气埋管温度高的情况要低。空气埋管温度降低的结果是,燃气轮机的输出功率减小,见图 4。

从系统效率、经济性及技术可行性方面考虑,我们认为第 5 种系统配置方案较为适合我们的研究目的。其原因是, B 种煤气虽然效率高,但煤气化工艺正处于初步发展阶段,比蒸汽气化过程难于实现,而蒸汽气化技术已较为成熟;选用 FT-8 燃机,可使燃气轮机、蒸汽轮机均在设计点工作,达到系统部件匹配的要求,使系统供电效率达到 38.59%,比常规系统(供电效率为 32%),提高了 6.59%。

综合以上结论, FT-8 用于 CGCC 系统不仅对系统的性能有所改进,而且对于 FT-8 自身的性能也有很大提高。这为航空燃气轮机在地面系统的应用开拓了广阔的前景。

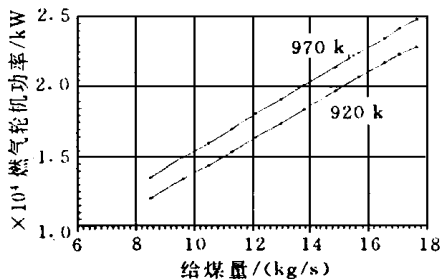


图 4 燃气轮机功率的变化

参 考 文 献

- 1 焦树建. PFBC 燃气—蒸汽联合循环发展的现状与趋势. 燃气轮机技术, 1992, 5(3)
- 2 Monhardt R J, Richardson J H, Boettcher J M. Design and Testing of the FT-8 Gas turbine Low-Pressure Compressor. ASME Trans, 1990, 112
- 3 赵士杭. 燃气轮机循环及变工况性能. 清华大学出版社, 1993

(责任编辑 魏星禄)

– 12°. Moreover, the swirls at the duct exit have different senses of rotation when the blade is held at these two angles. The study lays the foundation for suppression of the duct swirl and its simulation.

Key Words Air inlets Flow distortion Flow characteristics Control problems

DETERMINATION OF REVOLUTION DIFFERENCE LINE FOR TWIN- SPOOL TURBOJET ENGINE

Shang Yi and Guo Yufei

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

ABSTRACT The revolution difference of the low and high pressure rotors is a parameter for acceptance tests of a twin- spool turbojet engine. It indicates the relation between the reduced revolution of the high pressure rotor and the reduced turbine inlet temperature and also shows the matching between the low and high pressure rotors. In order to determine the revolution difference for a twin- spool turbojet engine it is necessary to define a standard revolution difference line for this type of engine. This paper analysis considers various possible approaches for the revolution difference line computation and suggests how to define the standard revolution difference line in practice.

Key Words Twin- spool jet engines Rotation speed Differences Computation

STUDY ON AIRCRAFT ENGINES USED IN COAL- FIRED DIFFERENT- VELOCITY BED COMBINED CYCLE SYSTEM

Zhao Li, Xu Xiangdong, Zhu Weimin

(Dept. of Thermal Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100080)

ABSTRACT A new combined cycle system for generating electrical power from coal- Carried- heat Partial Gasification Coal- fired Combined Cycle (CGCC) is introduced by Tsinghua University. Which adopts a gas turbine modified from FT - 8 aeroengine. Through analyzing the function of the gas turbine, using modeling technique, the design and off- design regimes of the gas turbine are considered comprehensively. It is proved that application of the FT - 8 to CGCC system has a great advantage.

Key Words Combination Cycles Gas turbines Performance analysis

QUASIDYNAMIC ANALYSIS OF HIGHSPEED THRUST BALL BEARINGS

Luo Zhusan, Wu Linfeng, Sun Xinde

(5th Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Gao Xiangqun

(Nanhua Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002)

ABSTRACT A quasi- dynamic analysis of high- speed thrust ball bearings is proposed to predict the kinematic characteristics. The rolling velocity and relative sliding velocity of each point in contact zone of balls and rings in a ball bearing are determined at first. According to the elastohydrodynamic and hydrodynamic lubrication theories, the reactions between the rolling pairs and the effects of heat and oil starvation on the thickness of oil film are considered. Then the principles for setting up the basic equations of the balls, the cage and the inner ring are established for the quasi- dynamic analysis of the thrust bearings. The kinematic characteristics, the load distribution, the thickness of the oil film and the fatigue life of the ball bearings can be obtained from solution of those equations. It is shown that the