

微型燃气轮机技术

杨 策, 刘宏伟, 李 晓, 买靖东

(北京理工大学 车辆与交通工程学院, 北京 100081)

摘 要: 高效微型燃气轮机发电机组可用于航空、航天等领域, 还可用于分布式发电、军用车辆辅助动力装置、车用混合动力装置等, 因此研究这种动力装置有很重要的实用意义。首先介绍了微型燃气轮机的发展过程, 简要说明了过去 40 年内微型燃气轮机在结构上发生的变化。随后给出了组成微型燃气轮机的关键部件在设计过程中应注意的一些问题。最后回顾了国内一些研究单位在这一领域所进行的研究工作, 并指出了今后的努力方向和工作重点。

关键词: 微型燃气轮机; 辅助动力; 混合动力

中图分类号: TK47

文献标识码: A

1 微型燃气轮机发展过程

在过去的 40 年时间里, 微型燃气轮机发电技术得到了迅速的发展。所谓微型燃气轮机是指发电功率在几百千瓦以内的动力装置。最初, 这种装置是用于辅助动力的, 最明显的例子是装甲车辆车载辅助动力装置。美国国家航空与宇航管理局 20 世纪 60 年代在涡轮增压器的基础上发展了一种微型燃气轮机发电装置, 这个机组的发电功率 3 kW。采用无回热的简单循环, 使用单级离心压气机, 单级径流涡轮及滚动

轴承结构。减速器为两级减速, 输入转速 139 035 r/min, 输出转速为 3 600 r/min。为了保证机组在宽广范围内稳定工作, 使用了机匣处理技术扩大压气机稳定工作范围。微型燃气轮机作为辅机电站还用在航天飞机上。早在 20 世纪 70 年代, 美国国家航空与宇航管理局开展了这方面的研究^[1]。航天飞机在飞行过程中采用两个动力系统作为辅助动力装置, 即在大气层中飞行时使用微型燃气轮机作为辅助动力装置, 而在外层空间飞行时使用氢氧作为燃料推动涡轮做功带动发电机发电。在大气层内飞行时, 燃气轮机使用氢和空气作为燃料, 是一个开式布雷顿循环。

微型燃气轮机除了用于军用车辆的辅机电站外, 带有回热器的高效微型燃气轮机发电机组还可用于分布式发电、热电冷联供、车辆混合动力装置等领域, 因此应用前景非常广阔。据预测, 在未来的十年里, 燃气轮机有可能代替柴油机作为汽车动力。目前, 世界各国正在努力研究燃气轮机和燃料电池联合循环系统, 如美国能源部和西屋电器公司在过去的十年里为把管式固体氧化物燃料电池(SOFC)和燃气轮机联合循环系统应用于商业市场做

了很多研究工作^[2], 其中在管式固体氧化物燃料电池方面进行的工作有, 把燃料电池的发电能力由 3 kW 提高到 150 kW, 其工作时间长达 69 000 h(7.9 年), 建立了燃料电池使用时间的世界记录。管式固体氧化物燃料电池开发项目的最终发展目标是对加压固体氧化物燃料电池和燃气轮机联合循环进行研究, 这种系统可用于分布式发电。商用固体氧化物燃料电池和燃气轮机联合循环发电效率高达 60%~75%, 是目前矿物燃料动力发电技术中效率最高的。这种联合循环工作过程是: 空气在压气机中经压缩后, 进入回热器加热, 然后进入燃料电池内, 与天然气中的氢气进行化学反应, 产生交流电和热排气。热排气进入涡轮膨胀做功, 涡轮发出的功带动压气机和发电机, 燃料电池排气温度 843 °C, 工作压力为 3~7 个大气压, 可以看出, 其排气温度和压力均适合目前已有的燃气轮机工作。据最新报道, 美国能源部和西屋电器公司成功建了一个 250 kW 固体氧化物燃料电池与燃气轮机联合循环示范电站, 其中燃料电池发电 200 kW, 燃气轮机发电 50 kW。

早期的微型燃气轮机一般采用单级离心压气机, 单级向心或

单级轴流透平,发电机在离心压气机端通过减速箱相连,燃烧室有环型和单管燃烧室两种,支撑系统多采用滚珠轴承和滚柱轴承,整个机组需要润滑系统。有些机组,由于不带回热装置,因此其耗油率较高,机组的经济性较差。随着技术的发展,微型燃气轮机的结构发生了很大变化。高速永磁发电机的出现使发电机与压气机之间的连接不再需要减速机构,这使整个机组的重量大大减轻,尺寸大大减小,成本也降低很多。与此同时,采用空气轴承代替滚动轴承,由于空气轴承不需要润滑系统,导致机组零件大幅度地减少,制造成本也进一步降低。为了提高机组的热效率,普遍采用高效紧凑型回热器,其回热效率高达90%,这样可使微型燃气轮机发电机组循环效率达30%左右。为了进一步提高循环效率,一个行之有效的办法是提高燃烧室出口温度,也就是提高涡轮入口温度,但是涡轮入口温度的提高受涡轮材料的限制,使其不能过高。为了克服这一矛盾,世界上一些著名的研究机构相继开展了采用陶瓷作为燃烧室、涡轮、回热器等热端部件的材料。其中文献[3~5]对把这种材料制作成的部件用于车辆动力进行了研究,并取得了令人满意的结果。据预测,如果热端部件均采用陶瓷材料的话,可使循环温度进一步提高,从而使循环效率高达35%。

2 组成微型燃气轮机的关键部件

2.1 压气机

现有微型燃气轮机发电机组的压气机多采用离心式压气机,

而很少采用轴流式压气机,且压气机的增压比多在3.0~4.0之间。在过去的几十年时间里,世界上一些著名的研究机构一直致力于离心压气机设计方法的研究,在追求高效率的同时,还在不断进行如何拓宽高效区范围和拓宽稳定工作范围的研究。和轴流压气机相比,离心压气机叶轮具有单级压比高,容易加工,制造成本低等优点,同时还有抗进口流场畸变能力强的优势。目前在微型燃气轮机上使用的离心压气机叶轮多采用后弯式叶轮,在压比低于4.0情况下,叶轮材料可采用铸造铝合金或者锻造铝合金。在压比高于4.0时,采用钢或铁合金材料。目前还发展了一种碳纤维作为叶轮材料。

2.2 透平

微型燃气轮机上经常使用的透平有向心透平和轴流透平。向心透平突出优点是简单、成本低、性能优和容易装配,对叶尖间隙不敏感,其缺点是惯性较大,虽说轴流涡轮膨胀比有限,但对膨胀比相对较低的微型燃气轮机而言也是有足够的做功能力。在设计涡轮过程中,应注意涡轮的最高效率点对应流量系数在0.2~0.3,载荷系数在0.9~1.0之间。但是在很多情况下实际设计的涡轮流量系数并不一定处在这个范围之内。比如增加流量系数使其大于0.3,这样做虽说增加了出口子午速度,但却减小了出口面积,带来的好处是使涡轮尺寸减小、重量减轻。涡轮设计过程中另外一个值得注意的问题是要保证所设计的涡轮速比在0.7左右,这样获得的叶轮才有可能得到较高的效率。

2.3 发电机

微型燃气轮机发电机组使用的高速发电机有永磁发电机、磁阻式发电机、单极感应式发电机、伦德式发电机。永磁材料的不断改善使高速永磁发电机的效率和质量都优于绕线磁极式发电机,这种发电机已经达到了在260℃下正常工作水平。微型燃气轮机发电机组使用高速发电机所面临的主要问题有高速平衡问题、磁性保持及温度限制问题、狭小空间内部件冷却问题、精密零件的维护和修理问题。

低速同步电机和高速永磁发电机各有不同的优缺点。低速发电机的优点有转速低,对转子的动力性要求不是很高,不需要频率转换器,整个发电机的成本比较低,冷却问题不突出。它的缺点是要有减速箱,因此带动减速箱需要克服一定的阻力,整个机组起动相对困难,而且发电机的尺寸过大,重量也大。高速发电机的优点是体积小,由于没有减速箱,因此没有减速箱产生的阻力损失。由于允许机组在较高的转速下点火,这样就不需要额外的点火电路和点火起动供油系统,因此也简化了机组的起动过程。采用高速发电机的缺点是需要把高速发电机产生的高频交流电流转化为直流电流,及直流电流转化为交流电流的过程,这样就会产生转换器和逆变器损失。高速发电机的冷却问题也很突出,电机的成本也相对高一些。此外,设计发电机转子时还要考虑转子的应力分布,及其旋转阻力等。

2.4 空气轴承

空气轴承是利用空气弹性垫来起支撑作用的一种新型轴承。基于空气的固有属性(粘度低且随温度变化小等),空气轴承在高

速、低摩擦、高温、低湿的场合, 具有一定的优势。由于在一些高速旋转的机构上采用了空气轴承, 突破了使用滚动轴承或油膜轴承所不能解决的困难。与其它类型轴承相比, 空气轴承有以下特点: 空气的粘度很小, 导致磨擦损耗小, 发热与变形也极小, 因此空气轴承在超精密和超高速主轴中的应用大有前途。除空气的粘度几乎可以忽略不计外, 它的清洁、化学上的惰性和稳定性, 以及在地球上取之不尽的优点, 使它成为十分诱人的润滑剂。与滚动轴承相比, 空气静压轴承振动小。空气轴承的主要缺点是承载能力低, 刚性差。

目前使用的空气轴承主要有空气静压轴承和空气动压轴承两大类。空气静压轴承承载能力相对较高, 它靠外部供给压力气体进行工作。空气动压轴承则是靠轴承与轴表面相对运动产生压力气膜承受载荷的。由于空气静压轴承需要外部气源供给压力气体, 因此它不适应微型燃气轮机发电机组使用。目前微型燃气轮机发电机组使用的是空气动压轴承。

2.5 燃烧室

微型燃气轮机发电装置经常采用的燃烧室类型有: 单管燃烧室和环形燃烧室。环形燃烧室又可分为折流环形燃烧室和回流环形燃烧室。为了降低排放, 微型环形燃烧室广泛采用催化燃烧技术。使用催化燃烧技术后, 能够保证燃烧室内的空燃比在很低情况下稳定燃烧。这样就可以控制燃烧温度在低于形成 NO_x 温度下燃烧, 而燃烧效率依然高达 99.5%。催化燃烧室一般有三个区域组成: 预热区域、预蒸发和预混合区域、催化燃烧区域。

对于微型燃气轮机而言, 由于燃油流量比小型燃气轮机还小, 在使用喷嘴供油时, 为了保证燃油和空气的均匀掺混, 要采用数量较多的燃油喷嘴, 致使分配到每一个燃油喷嘴的燃油流量更加微小, 燃油喷嘴很难加工。如果减少喷嘴数目, 则又很难保证燃油和空气的均匀掺混。采用喷嘴供油的另外一个问题是很容易使喷嘴产生磨损和堵塞。因为喷嘴尺寸越小, 越容易产生磨损和堵塞。为了保证燃油供给系统的可靠性和燃烧室出口温度分布的均匀性, 微型燃气轮机经常采用折流环型燃烧室和配合甩油盘的供油方式。这种燃烧室成本低, 工作可靠, 并且容易实现, 因此有必要对这种折流环型燃烧室和甩油盘供油方式进行介绍。甩油盘的供油方式最早是由法国的透博梅卡发动机公司提出并用于小型燃气轮机上的, 其后这种供油方式在多种型号发动机上得到使用, 比较有代表性的有美国 J69 以及我国的 WP11 等。甩油盘供油系统的工作原理是这样的: 甩油盘和轴一起旋转, 在甩油盘上均匀分布 6 个或 8 个小孔, 燃油经过供油管道打入甩油盘, 甩油盘内的燃油在离心力作用下产生压力, 经甩油盘上的小孔靠离心力甩入燃烧室, 以上述方式实现燃油与空气的均匀掺混, 达到防止油孔堵塞的目的。采用甩油盘供油方式, 不要求甩油盘上的孔被完全填满, 因此这些孔的实际通流能力可以比实际要求大好多倍。使用大孔的目的是防止孔被堵塞。在加工甩油盘时应保证甩油盘上的孔的尺寸均匀一致, 且表面要磨光。因为由流体动力学我们知道, 这些孔的喷油量是否均匀一致是由它们的

尺寸和表面光洁度决定的, 如果某一个喷油孔的喷油量多于其它的孔, 那末在燃烧室出口将出现一个旋转热斑, 热斑所撞击的涡轮叶片将受到损坏。

使用甩油盘供油方式还有结构简单、造价低廉等优点。进入甩油盘的燃油压力不需要很高, 只要能保证燃油顺利流进燃烧室即可。由于受燃料粘性影响很小, 因此这种系统具有适用于多燃料的能力。燃油雾化质量直接决定于轴的旋转速度(也就是甩油盘的旋转速度), 实验结果表明, 油滴当量雾化直径与甩油盘的周向速度成反比。以煤油为燃料时其当量直径表达式为:

$$\text{SMD} = \frac{0.0426}{\text{甩油盘周向速度 (m/s)}}$$

甩油盘供油系统的缺点是当工况变化时燃料供给量变化反应可能比较缓慢, 这主要是由于较长的燃油流路造成的。由于这种供油系统燃油雾化质量与轴的旋转速度密切相关, 一般要求轴的旋转速度在 20 000 r/min 以上, 因此这种供油系统不适合于转速较低的大型发动机, 而只适合于低压力情况下高速旋转的微型燃气轮机和小型燃气轮机。

微型燃气轮机发电机组普遍采用的另外一种燃烧室是回流环形燃烧室。在这种燃烧室中, 从离心压气机出来的气体, 在组织燃烧和与燃气掺混的过程中要经过两次折转再流入涡轮部件。燃烧室的燃油是由在环形燃烧室顶部的喷嘴提供。回流燃烧室使得压气机和涡轮之间的轴向长度大大缩短, 减轻了发动机的重量, 对提高压气机、涡轮轴的临界转速也有好处。回流燃烧室由于其气流通道较长, 油气混合比较均匀, 因而减少了排气污染, 降低了发

烟烟度,同时对压气机出口速度分布不敏感。

3 国内在微型燃气轮机方面进行的研究工作

国内一些研究单位虽说对微型燃气轮机发电机组进行了大量的研究工作,与国外相比还有很大差距。至今为止,还没有一种型号微型燃气轮机用于商业运行中。国内在微型燃气轮机领域进行过研究的单位有中国北方车辆研究所、南方航空集团发动机研究所、炮兵某部研究所、北京理工大学热能工程系等一些研究单位。本文对北京理工大学热能工程系在微型燃气轮机上已经进行和正在进行的研究工作进行简要的介绍。

在“九五”期内,北京理工大学和装甲兵装备技术研究所开展了对微型燃气轮机发电机组的研究,成功设计了一台带有动力涡

轮的双轴微型燃气轮机发电机组。机组的具体结构参见文献[6]。目前,北京理工大学热能工程系、装甲兵装备技术研究所、国营615厂等单位合作,正在研制一种单轴微型燃气轮机发电机组。这台机组的主要部件有离心压气机、向心透平、折流环型燃烧室、甩油盘、起动发电机等部件,目前正在进行工程设计,整机成本可望控制在很低水平。

为了提高国内微型燃气轮机研制水平,今后应加快研究适用于微型燃气轮机发电机组使用的高效紧凑式回热器,小流量、高效、高压比离心压气机,空气动压轴承,高速永磁发电机等关键部件。同时还要尽可能降低成本,使机组的成本控制在10万元以内,只有这样才能真正把微型燃气轮机推向国内市场。

参考文献:

[1] BURRISS W L, HAMILTON M L. Pre-

liminary design of an auxiliary power unit for the space shuttle [R]. Volume II-component and system configuration screening analysis. NASA CR-1997, N72-26032, 1997.

[2] BROWN R A. SOFC combined cycle system for distributed generation [R]. DOE/MC/28055-97/C0837, 1997.

[3] PATRICK O B. Development of a 50-kW, low-emission turbogenerator for hybrid electric vehicles [R]. ASME Paper, 98-GT-400, 1998.

[4] ITOH T, KIMURA H. Status of the automotive ceramic gas turbine development program-year 2 progress [R]. ASME Paper, 93-GT-40, 1993.

[5] NAKAZAWA N. The turbine components development for the 100 kW automotive ceramic gas turbine [R]. ASME Paper, 93-GT-64, 1993.

[6] 杨 策, 马朝臣, 鲍 捷, 等. 带有动力涡轮的双轴原理型燃气轮机的研制 [J]. 工程热物理学报, 2002, 23(4): 445-448.

(何静芳 编辑)

节能应用

高效节能的 CHP—DH 装置

据《Gas Turbine World》2001年7~8月号报道,芬兰赫尔辛基 Vuosaari 电站1号联合循环装置装有2台V64.3型燃气轮发电机组、2号不补燃的单压强制循环余热锅炉和1台43 MW背压抽汽式汽轮发电机组。该装置于1991年2月投入满负荷商业运行,基本负荷输出165 MW净电力和162 MW分区供热,CHP(热电联产)热效率高达91%。

V64.3是Siemens KWU公司的第三代工业燃气轮机。在ISO条件下,该燃机的基本负荷额定功率为53 MW。以天然气作为燃料,在1130℃涡轮转子进口温度下,V64.3简单循环基本负荷热效率为35.4%。

Vuosaari 电站2号联合循环装置装有2台更大功率的V94.2型燃气轮机、2台不补燃的双压自然循环余热锅炉和1台以背压抽汽方式运行额定功率为145 MW,而以凝汽方式运行额定功率为172 MW的三汽缸汽轮发电机组。

2号装置于1998年1月开始商业运行,基本负荷输出470 MW净电力和400 MW分区供热,CHP—DH(热电联产—分区供热)热效率高达92%。Siemens KWU公司的V94.2型燃机ISO基本负荷额定功率为157 MW,简单循环热效率为34.4%。

(思娟 供稿)

微型燃气轮机技术 = **Micro Gas Turbine Technology** [刊, 汉] / YANG Ce, LIU Hong-wei, LI Xiao, et al (Institute of Vehicle and Transportation Engineering under the Beijing University of Science & Technology, Beijing, China, Post Code: 100081) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 1~4

High-efficiency micro gas-turbine power generating sets are used in a variety of engineering sectors, such as aeronautics and astronautics, distributed electric power generation, auxiliary power plants for military vehicles, and hybrid power units for automobiles, etc. In view of this, the study of this type of power plants is of major practical significance. The development history of the micro gas turbines is first presented, briefly describing the changes in structure experienced by such turbines over the past four decades. This is followed by the enumeration of some problems demanding close attention during the design of the micro gas turbine key components. In conclusion, the authors reviewed the research work conducted by some Chinese institutions engaged in this realm of study. **Key words:** micro gas turbine, auxiliary power unit, hybrid power unit

循环流化床灰渣利用研究进展 = **Recent Advances in a Study on the Utilization of Circulating Fluidized Bed (CFB) Ash Residue** [刊, 汉] / LI Deng-xin, LU Jun-fu, GUO Qing-jie, et al (Thermal Energy Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 5~8

On the basis of analyzing the characteristics of circulating fluidized bed (CFB) ash residue a broad overview is given of the recent advances both at home and abroad in the comprehensive utilization of CFB fly ash. Owing to its low carbon content and the presence of a certain hydraulic activity the CFB ash residue can be used directly for the fabrication of cement or building materials. However, the high carbon content and poor hydraulic activity of the fly ash make it necessary to develop some relevant technologies prior to using it. The latter include the pelleting of fly ash for its return burning, the direct sending back of fly ash, and its sending back for desulfurization following its hydration, its use as a raw material for the manufacture of cement and also as soil ameliorative agents, etc. **Key words:** circulating fluidized bed, fly ash, low-carbon ash, processing and utilization

用 PIV 法研究燃气轮机冷却叶片的冷却空气流场 = **A Study of the Cooling Air Flow Field of Gas Turbine Cooled Blades through the Use of a PIV (Particle Image Velocimetry) Method** [刊, 汉] / LIANG Chen, LI Wei-shun, SUN Shu-lan (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 9~12

A PIV (particle image velocimetry) method is employed to measure the velocity distribution in a complicated internal cooling channel of the first-stage rotating blades of a gas turbine. The test rig, test method and results are described along with an analysis of the cooling-air flow conditions and its distribution modes. **Key words:** gas turbine, cooled blades, particle image velocimetry system, tests

汽轮机组回热系统故障诊断知识的模糊处理及诊断研究 = **An Investigation on the Fault Diagnostic-knowledge Fuzzy Treatment and the Diagnosis of the Regenerative Heating System of a Steam Turbine Unit** [刊, 汉] / LU Xu-xiang, LI Lu-ping (Power Engineering Department, Changsha University of Electric Power, Changsha, China, Post Code: 410077), HU Nian-su (Power and Mechanical College under the Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 13~16

A knowledge database of typical fault-sample modes and real-time fault modes for the regenerative heating system of a steam turbine has been set up based on the recognition of common faults and symptoms specific to the regenerative heating system of a thermal power plant. This was accomplished through the use of fuzzy mathematics knowledge and related theories with regard to the various change directions and degrees of the fault symptom parameters of the regenerative heating system, using different variation grades and thresholds. Meanwhile, by utilizing a radial base-function network based on a MATLAB environment established was a fault diagnostic model for the regenerative heating system. Moreover, a neural network model has been verified through the simulation of typical faults by a power plant simulator. Practice indicates that