

ГТД8000 和 ГТД15000 船用燃气轮机的设计特点

Виктор · П · Романов

(乌克兰 机器设计科研生产联合体)

〔摘要〕 本文描述了新一代的 ГТД8000 和 ГТД15000 发动机的设计特点和性能数据,这些发动机的效率在(34~35)% (简单循环,ISO 条件)。提出了为使发动机达到高性能在设计和技术改进方面的主要趋向。介绍了新燃气轮机的应用实例。

关键词 燃气轮机 设计特点

发动机设计特点

ГТД8000 和 ГТД15000 燃气轮机是为船舶推进动力而设计的。然而,将这些发动机用于其它方面也没有什么大的障碍,如用于陆用电站、卡车电站或天然气管线增压站。

船用推进装置必须满足各种型式的运行要求,发动机的设计也由此而确定,发动机参数见表1。发动机是双转子燃气发生器,包括低压压气机和高压压气机,驱动它们的各自涡轮,以及通过减速器驱动螺旋桨的动力涡轮(图1、2)。设计 ГТД8000 和 ГТД15000 发动机时更多地注意到在前一代发动机发展和运行中所获的经验,发动机的气体动力学部分基本上没有变化,但设计有了重要改变。

图3是上一代的 Д59 发动机的示意图。在 Д59 发展和运行过程中发生的主要问题是传动方面,尤其是高压转子三支点系统的轴承和在低压涡轮、低压压气机间传递功率的内轴的中间轴承。设计 ГТД8000 和

ГТД15000 时确立了以下目标:传动轴的长度应最短,轴承数最少,刚性转子,以避免采用三支点系统和内轴轴承。为达此目标,作了相应的设计。

燃烧室位于高压压气机外

实际上是用回流式燃烧室来替换现有燃烧室的问题。所有早期设计的发动机是直流布置的,企业也没有发展回流燃烧室的经验。直流燃烧室中很难有效地缩短火焰筒长度,因为当燃烧柴油或更重质的燃料时有燃烧不充分的危险。而回流式燃烧室空气并非轴向进入火焰筒,涡轮前来流有温度分布不均匀的风险。与直流相比,气流动力特性复杂(转360°),回流燃烧室肯定会导致流阻损失增加。但是,对于这样结构的燃烧室其可能达到的最小损失水平还不了解。这就赋予了燃烧室设计师以充分自由来研究这些问题。

收稿日期 1993-01-18

本文联系人 Виктор · П · Романов 男 总经理、总工程师 乌克兰尼古拉耶夫市

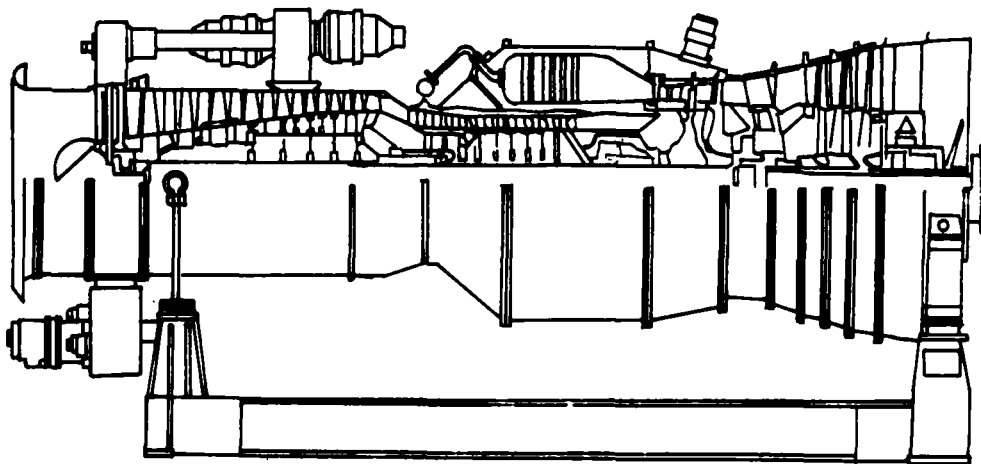


图 1 GTD8000 燃气轮机示意图

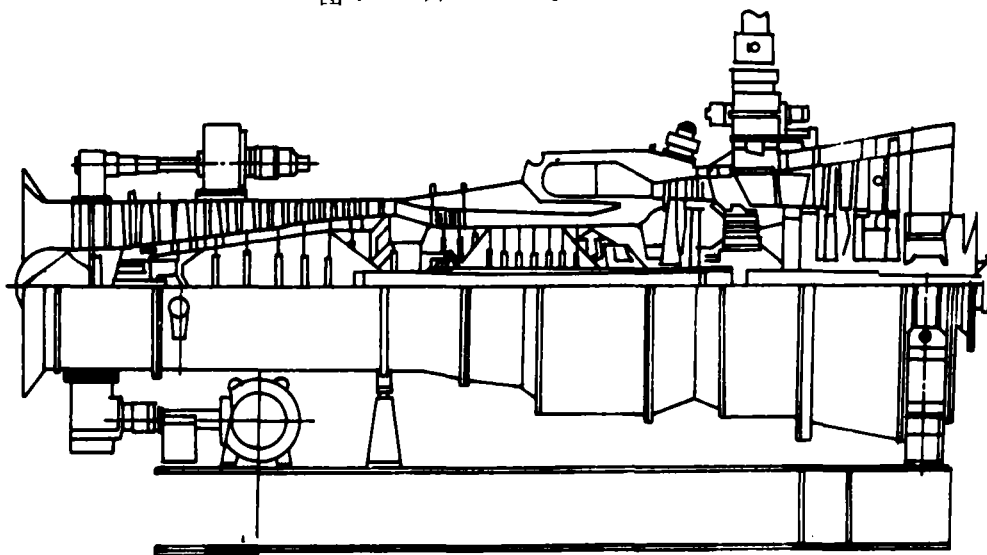


图 2 GTD15000 燃气轮机示意图

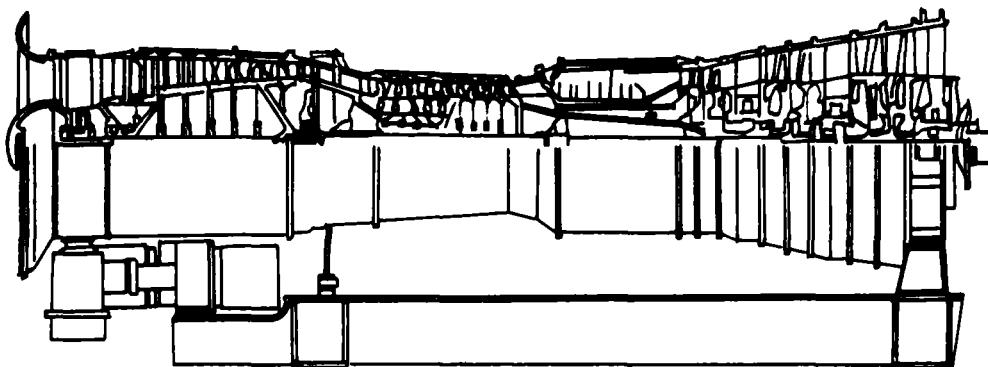


图 3 T159 燃气轮机示意图

表1 发动机参数

型号	功率 (kW)	空气流量 (kg/s)	压比	燃气初温 (K)	转速(r/min)			效率(ISO) %
					低压转子	高压转子	动力涡轮转子	
ГТД8000	8 000	33	16.7	1 400	11 750	14 000	5 7000	35
							3 000	
							10 000	
							7 580	
ГТД15000	16 000	71	19.5	1 340	7 250	9 050	5 200	35
							3 000	

考虑到上述问题,为发展回流燃烧室建立了三个试验装置:

一个有机玻璃的气动力学装置,研究燃烧室气动力特性的最佳化。

一个单管燃烧室扇形段,用于研究火焰筒。

一个带一套火焰筒的全尺寸段,研究最佳点火和燃烧室出口沿周温度不均匀性。

火焰筒中的气体流型见图4。

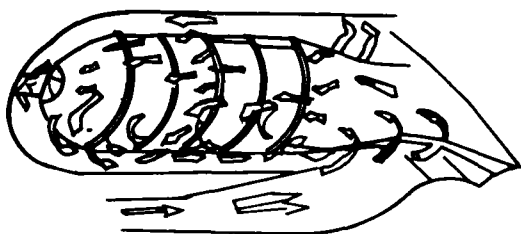


图4 回流燃烧室中的气体流型图

过渡段中的气流是回流型,即扩压器出口的空气流经过渡管掺混区通道,然后绕火焰筒从顶部、前部和底部流动,通过一次和二次区的孔注入。ГТД8000的燃烧室气流流动见图5,气流的方向和速度也在图上示出。为了将空气导入一次区、二次区及各环的空气冷却孔,在确定孔的尺寸和位置时考虑了上述所有因素。相对较大的燃烧室容积使空气流速降低,燃料能有效地燃烧,温度场均匀而

压力损失又可接受。在试验装置以及实际发动机上进行的研究和工程力求导致发展成功可靠的回流燃烧室,它仍具有以下主要性能:

燃烧效率 (98.5~99)%

压力损失 (4.5~5)%

出口温度场不均匀度 16%

热容强度 838 kJ/(m³·h·Pa)

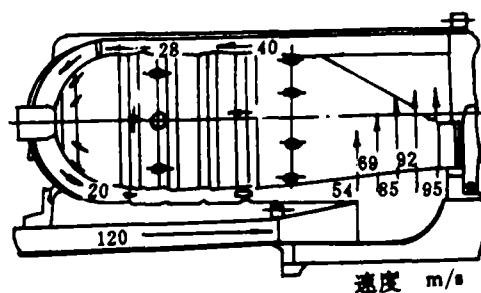


图5 ГТД8000发动机火焰筒气流图

双支点高压转子

回流燃烧室研制成功使双支点转子设计的途径变得明朗,即把高压压气机转子和高压涡轮组成一个整体部分。涡轮平均直径处的圆周速度从以往的(270~300) m/s提高到450 m/s,这使高压涡轮变为一级而不是以往常用的两级。与常规型式的高压涡轮转子不同,高压涡轮盘通过一个中间花键毂悬臂固定在转子后轴颈上(图6)。

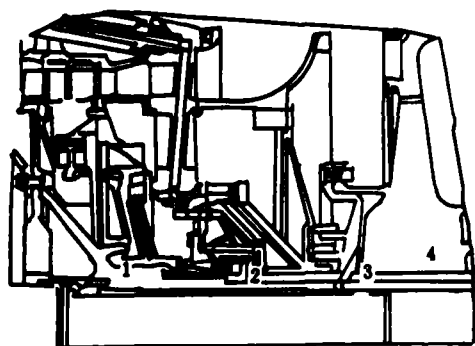


图 6 高压涡轮盘与高压压气机转子
联结组件

- 1 花键毂的前定位面 2 压气机转子后轴承
- 3 中间花键毂 4 高压涡轮盘

花键毂必须精确地装到压气机转子后轴颈上,以消除因高压涡轮盘不对中引起的不

平衡。花键毂前定位面内侧的位置上有油腔,借滑油冷却来保持该位置上的配合,这点已被发动机在各运行方式下的低振动值(不大于 10~15 mm/s)和没有共振峰所证实。

高压转子轴承的径向应力测量表明,所测得的径向应力是低而稳定的,与重量负荷略有不同,保证了它们的长寿命和可靠运行。

设计师为什么决定作这一主要设计改变呢?我们应回顾以前的 D59 发动机(图 7)。该机的高压压气机转子前端是滚柱轴承,后端是滚球推力轴承(也可以是一对轴承),一个两级的高压涡轮转子支承在滚柱轴承上(盘侧),转子轴的前端由固定在压气机转子后轴颈上的花键毂所支承(图 8),花键是短的,因间隙增加,它们不是侧面密接,仅保持轴向应力负荷。

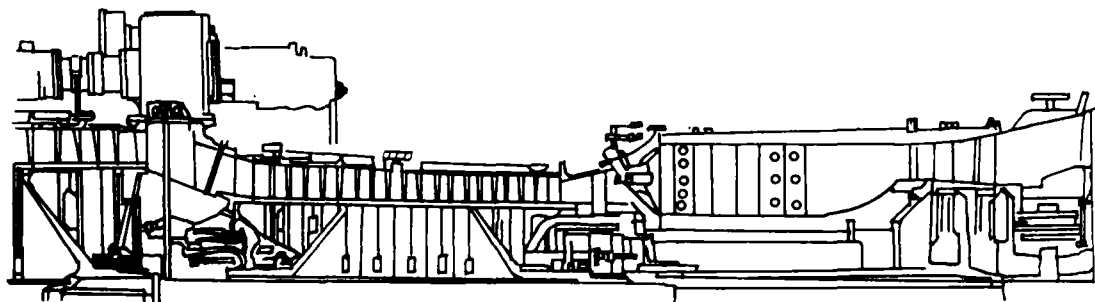


图 7 D59 发动机高压压气机、高压涡轮示意图

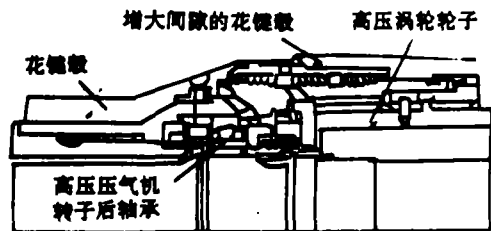


图 8 高压压气机和高压涡轮转子的联接

一个松的花键联接是为了补偿不对中,但当传递高扭矩时它成为“刚”的了,这一观点已被三支点高压转子系统运行后的转子轴

承情况所证实。运行中,有两种类型的滚柱轴承损坏:压气机转子前轴承和涡轮转子后轴承上可看到因超负荷引起的沟槽碎裂的痕迹,或反之,因打滑而引起的在内滚道上的磨痕。实践证明,当滚柱轴承承受 300~500 公斤转子重负荷时没有滑动。然而,在三支点系统中的花键联接部分会因扭矩的缘故使其变“刚性”,致使减轻了轴承的重量负荷,轴承因“悬浮”而发生打滑。推力轴承则由于有轴向负荷而从未发生过滑动。在 D59 发动机上

除因轴承沟槽碎裂引起的故障外,在管线压缩机站运行的发动机,大部分故障发生在这个轴承。

高压转子轴承的径向应力则用专门研制的轴承外环(图9)直接在发动机上作应变测量评定。确信该发动机的轴承受到了与高压压气机和高压涡轮支承不对中有关的重大的径向应力(图10)。随后采取工艺措施来保证高压转子三个支承的同心和更精确的转子联接装配,这些措施减少了轴承的故障,但问题仍未被解决。其间所进行的工作表明一个三支点系统要达到轴承稳定运行是非常困难的,

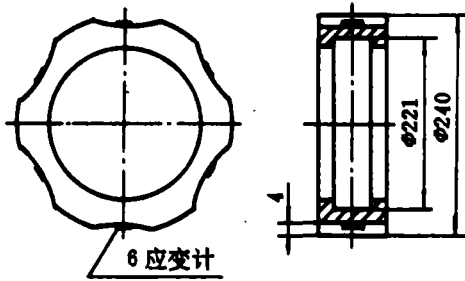


图9 径向应力应变测量用轴承外环

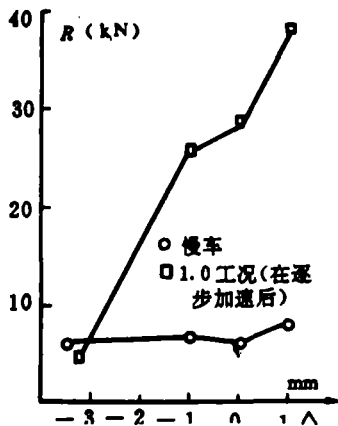


图10 因高压压气机和高压涡轮支承间的不对中(Δ)而引起的高压压气机后支承轴承上的径向应力(R)

这就需要対 ГТД8000 和 ГТД15000 发动机探寻一种更可靠的设计。让我们回到上述发动机的其它设计特点的讨论上。

低压涡轮

低压涡轮与高压涡轮一样是单级,一个滚珠轴承座位于涡轮与动力涡轮间的承力机匣中,低压涡轮轴是套轴的内轴,它与低压压气机转子后轴颈刚性联接。有两点应指出:首先,因为高压转子的长度已被大大缩短,因此似乎有可能将低压涡轮直接与低压压气机联接,而无需象 Д59 那样带一个中间内轴轴承,低压涡轮转子是刚性的,临界转速裕度为 1.42。其次,若低压转子已成为一种三支点系统,而这在高压部分的研究中已表明是不希望的。

实际上,低压涡轮转子的长轴设计成“刚”的,但它的柔性又足以补偿弹性变形引起的合理的支承不对中。必须保证低压涡轮轴与压气机后轴颈的精确联接,以避免因不对中而引发的高振动水平。然而这些要求并没有超过对燃气轮机零部件制造和装配时的一般要求范围。

支承机匣

高压涡轮和低压涡轮间的支承机匣因转子支承的改进而无必要了,在主要高温区删除了这样一个复杂部件给 ГТД8000 和 ГТД15000 发动机带来新结构的优点。

用带转低压压气机来起动发动机

通过高压转子起动双转子燃气轮机是一种传统的技术作法,为此,相应的齿轮箱安装在高、低压压气机间的中介机匣上。随着燃气轮机寿命达到数千和数万小时,齿轮箱要在这样长的寿命期内可靠运行是困难的。齿轮

箱位于压气机间的中介机匣上妨碍了维护人员进行技术维护,没有大的起吊设施也不能更换齿轮箱。

研究了通过低压转子起动发动机的可行性,通过努力实现了这一概念。在低压压气机旋转时,高压压气机也被气流带转,但是有相当时间的延滞,在高压转子转速达到燃烧室供油和开始点火前这种延滞是不可避免的(图 11)。

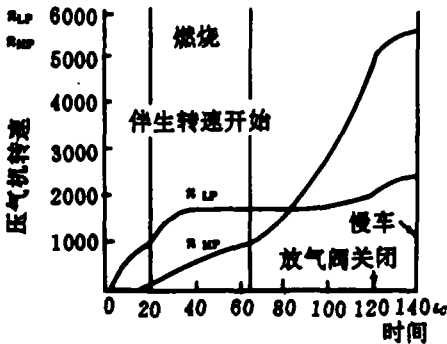


图 11 GTD15000 发动机高、低压压气机转速随发动机起动时间的变化关系(通过带转低压压气机起动)

当转动时,低压压气机以喘振方式运行(在左侧),但一旦点火开始,高压转子就加速,两个压气机就象通常起动那样继续工作。从低压压气机起动需增加起动机功率,这被认为是一个缺点,但这并没有带来实质的复杂性,高压转子没有了对限制发动机寿命的齿轮箱,这反而是一个明显的优点。

齿轮箱装于前机匣有足够的空间,低压压气机的转速低于高压压气机,可达性也好,所有这些因素提供了一个长寿命、高可靠性的燃气轮机。

本文叙及的 GTD8000 和 GTD15000 发动机的主要设计特点并结合其它一些新设计可用于发展船用或工业用的先进燃气轮机。

燃气初温达 1 300~1 400 K,压比 17~

20,因此燃气轮机效率可高达(34~35)%,与此同时,发动机的热端部件仍能长期工作。压气机叶片和其它零部件用钛合金,涡轮叶片则用高铬镍基合金,并有防护涂层,这使发动机对环境条件和燃油质量变得不敏感。

在整机试验前,首先进行部件试验。企业拥有一个功率达 35 000 kW 的压气机试验装置,可以试验各种功率发动机的压气机。还有同样功率的涡轮试验台,空气流量 70 kg/s。用于燃烧室及全尺寸涡轮试验的气源,在压力为 2 MPa 时流量可达 70 kg/s,压力为 3 MPa 时流量可达 30 kg/s。试验装置还可对叶片及其它零部件进行热力和应变测量。GTD8000 和 GTD15000 发动机已完成了全尺寸试验,现已投入批量生产。

结 论

通过设计努力已经建立了新一代的燃气轮机——GTD8000 和 GTD15000,它们的效率为(34~35)%,比前一代提高了约 20%,质量则显著减小。现在 GTD8000 和 GTD15000 发动机已正用作各类船舶主推进装置,包括水翼艇和气垫船。以 GTD8000 和 GTD15000 发动机为基础已建造了大量的工业用装置:ГПА-6 和 ГПА-16A 输气泵装置,ГТГ-6 和 ГТГ-16 箱装式电站装置,ЭГ-15У 热电联供装置。

作者对“机器设计”科研生产联合体的 П. И. Вдовин, В. В. Лупандин, А. И. Сташок 给予本文的支持和帮助表示诚挚谢意。

作者委托闻雪友先生翻译,在中国发表。

(梁源沥 编辑)

**JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL
ENERGY AND POWER**
1993 Vol. 8 No. 3

CONTENTS

(113)МАШИНОЕКТ-the Cradle of Marine Gas Turbines of the Former Soviet Union.....

Wen Xueyou (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

(117)Design Features of ГТД 8000 and ГТД 15000 Marine Gas Turbine Engines.....

Victor I. Romanov (*NPO Mashproject, Nikolayev, Ukraine*)

This paper describes the design features and performance data of new generation ГТД 8000 and ГТД15000 engines. The efficiency of these engines is (34-35)% (simple cycle, ISO conditions). This paper presents the basic trends of design and technology improvements resulting in high performance engines. Some examples of new gas turbine applications are given. **Key words:** *gas turbines*

(123)An Experimental Study on the Adjustment of Steam Injection Tube Insertion Length for a PG 5361 STIG Gas Turbine.....Zhou Jizhong, et al. (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

The authors discussed the effect of tube insertion depth at mixing-dilution holes on the performance of a gas turbine combustor. Briefly described are also the relevant test facilities and experimental test methods. **Key words:** *gas turbine, combustor, steam injection, experimental study*

(130)Performance Test of the Gas Generator of a Double-Flow Fan Engine With Variable Duct Resistance.....Ye Zide, et al. (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

This paper deals with the test plant and test results of a gas generator of a by-pass dual-rotor engine with variable duct flow path resistance. The said test results will provide valuable data for the potential on-land applications of turbofan engines and create an effective avenue for relevant engine modifications. **Key words:** *test plant, test results, turbofan engine, engine inner and outer duct*

(134)The Design and Study of Naval Steam Turbine Last Stage Blades.....Sun Xianliang, et al. (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

With regard to a high-capacity naval steam turbine last stage blades a study has been conducted of the following items: thermal parameter, geometric dimensions, the calculation of geometric characteristic data of various blade section profiles, blade configuration, the selection of blade root profile, blade strength calculation, blade mounting and blade vibration calculation, etc. **Key words:** *steam turbine, last stage blade, blade profile, blade root, strength and vibration*