

文章编号:1000-8055(2011)10-2293-09

旋转冲压压缩转子研究进展及发展前景

钟兢军, 韩吉昂, 杨 凌

(大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘 要: 在基于激波压缩技术的旋转冲压压缩转子概念、原理和结构特点分析的基础上, 综述了国内外在这一领域的研究进展, 并对这种基于激波压缩技术的压缩系统研究过程中需要突破的技术难点和未来发展前景进行了分析及讨论。

关 键 词: 旋转冲压压缩转子; 激波压缩技术; 研究进展; 技术难点; 发展前景

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Research progress and development prospects of the ram-rotor

ZHONG Jing-jun, HAN Ji-ang, YANG Ling

(Marine Engineering College,

Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: Based on analysis of the concept, principle and structure characteristics about the ram-rotor that adopts the technology of shock compression, the research progress both at home and abroad in this field was summarized, and technical difficulties and development prospects of the new compression system were also analyzed and discussed.

Key words: ram-rotor; technology of shock compression; research progress; technical difficulties; development prospects

燃气轮机是国防工业和国民经济领域具有重大作用的战略产品, 其相关技术的发展直接影响着一个国家的国防、能源、安全和工业竞争能力。因此, 先进的燃气轮机技术已经成为一个国家科技水平、工业先进水平、军事实力、甚至综合国力的一个重要标志^[1-2], 同时也是各国科技及军事工业优先发展的领域和研究开发的重点^[3]。

燃气轮机的循环过程主要由压缩、加热和膨胀三大部分组成, 能否在加热前对气体进行有效的压缩将对燃气轮机热力性能的好坏产生至关重要的影响。在实用范围内, 压缩比越大、压缩效率越高, 对燃气轮机的热力性能越有利。因此, 为了

提高燃气轮机的性能, 就需要研究单级压比高和效率高的压缩系统。为此, 需要不断发展新概念、新方法, 开发新技术并将其应用于压气机的设计之中以期获得性能优良的压缩系统。

旋转冲压压缩转子^[4]是一种主要基于激波压缩技术的新型压缩系统, 其在设计过程中融合了轴流和离心式压气机的设计技术, 与常规压气机相比, 预期具有单级压比高、结构简单、体积小和质量轻等优点。这种基于激波压缩技术的压缩系统本身所具有的诸多优点使其在船舶、车载、工业燃气轮机和分布式供能用微小型燃气轮机中有着令人期待的应用前景。

收稿日期: 2010-11-03; 修订日期: 2011-02-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2007AA05Z255); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 钟兢军(1963—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事叶轮机气动热力学研究。

1 旋转冲压压缩转子概念的提出及特点

1.1 旋转冲压压缩转子概念的提出

激波压缩是超声速进气道中常用的一种气流增压方式,具有压比高(来流马赫数约为 2.2 时即可实现 10:1 的压比,见图 1)和压缩效率高等优点,但是这种高效气流压缩方式的应用必须满足超声速来流条件.如果在低速来流条件下仍能采用激波系对气流进行压缩,将能大大拓展这种气流压缩方式的应用范围,为其在压缩系统中的实际应用提供必要的前提.基于这样的思想,美国 Ramgen 动力系统提出了一种新型超声速压气机的概念——Rampressor 的概念(图 2^[5]),旋转冲压压缩转子(图 3^[4,6])是其核心部件.

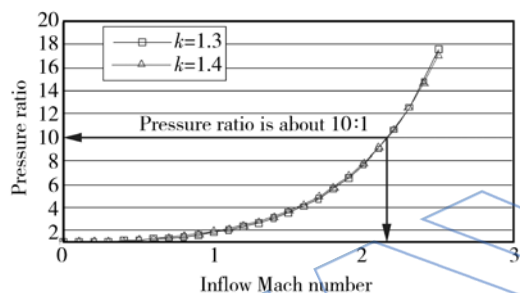


图 1 压比随来流马赫数的变化

Fig. 1 Pressure ratio versus inflow Mach number

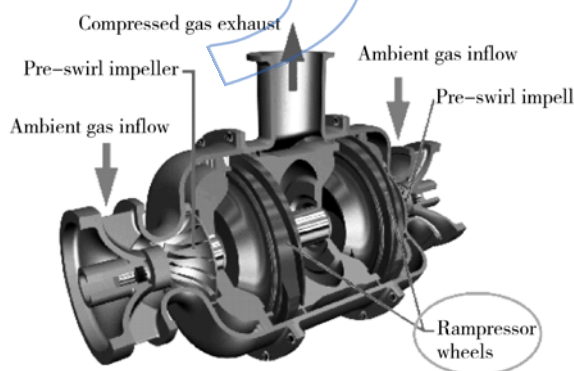


图 2 Rampressor 结构示意图^[5]

Fig. 2 Structural diagram of Rampressor^[5]

这种新型压缩系统的基本原理是利用轮盘的高速旋转使其轮缘处的气流速度达到相对超声速,相对超声速的气流流过轮缘上以一定角度安装的类似于二元超声速进气道通过弯曲变形获得的进气流道(图 4^[4])时,将会产生一系列的激波

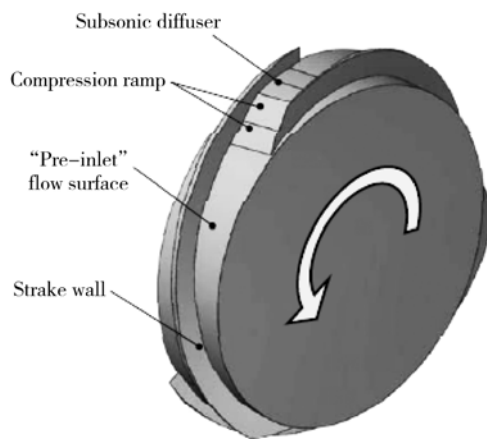


图 3 旋转冲压压缩转子结构示意图^[4,6]

Fig. 3 Structural diagram of ram-rotor^[4,6]

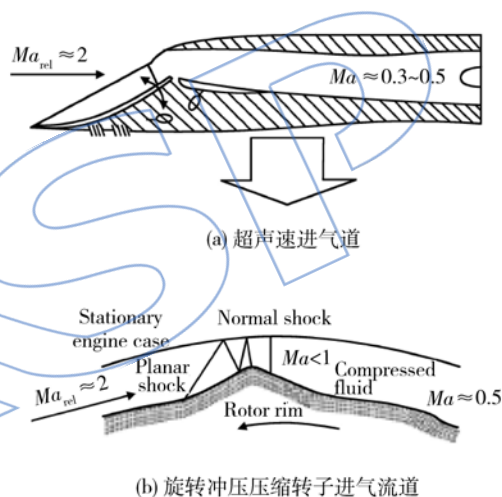


图 4 旋转冲压压缩转子流道转变示意图^[4]

Fig. 4 Change of the flow-path in the ram-rotor^[4]

系,旋转冲压压缩转子正是利用这些激波系实现气流减速增压的目的.

1.2 特点

由于旋转冲压压缩转子是采用激波压缩技术作为其增压原理的革新压缩系统,因此,与常规轴流和离心压气机相比,其在结构、性能等方面具有如下固有的优势:

1) 单级压比和总压缩效率高. 旋转冲压压缩转子的单级压比可达 15^[7] 或更高. 故要实现相同的压比时,采用旋转冲压压缩转子可以大大减少压缩系统的级数,这会使气流在压缩系统中的折转次数减少,从而有效减少压缩系统中的气流损失,提高压缩系统的效率. 据估算,旋转冲压压缩转子在高的单级负荷条件下可获得不低于 85% (最高可达 93%^[7],如图 5^[5]) 的级效率.

2) 产生气动损失的面积小. 由于旋转冲压压缩转子轮缘进气通道是由安装在轮缘上的几个隔板(stake wall)、轮缘和静止的外机匣组成,其动叶(隔板)数目大为减少,从而使气流与动叶(隔板)接触面积减小,相应的气流与动叶之间的摩擦损失也会减小.

3) 体积小、质量轻、轴向长度短、结构紧凑. 旋转冲压压缩转子单级压比高,与常规压气机相比,实现相同压比时可减少压缩系统的级数,并且其轮缘上安装的动叶(隔板)数目不多,零件少,这些都减小了压缩系统的体积和质量,并缩短了其轴向长度,使其结构简单紧凑.

4) 可靠性高、成本低. 由于大大减少了故障多发的薄弱环节——动叶片(隔板)数目,从而使旋转冲压压缩转子可靠性较大程度上提高,而零部件数量的减少,也在一定程度上降低了其成本.

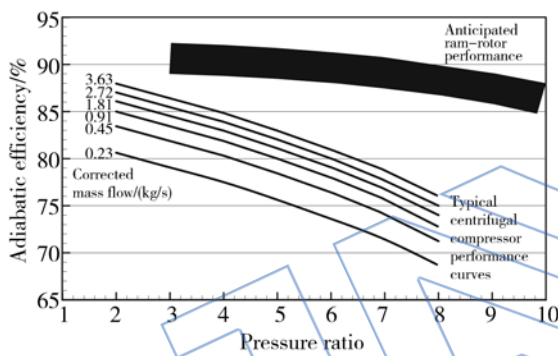


图 5 旋转冲压压缩转子预期效率与典型离心压气机效率的比较^[5]

Fig. 5 Anticipated efficiency of ram-rotor and efficiency of typical centrifugal compressor versus pressure ratio^[5]

2 国内外研究现状

2.1 国外研究现状

1992 年,美国人 Lawlor S P 成立了 Ramgen 动力系统公司,专门从事基于激波压缩技术的发动机与压气机的研究、建造和试验研究工作. 公司成立之初, Lawlor S P 根据其在华盛顿大学开展的冲压发动机研究工作基础,提出了一种新型结构形式的燃气轮机——Ramgen 发动机(图 6^[8]). 这种新型燃气轮机与常规燃气轮机在结构上有较大的区别,其核心部件是冲压发动机转子(图 7^[8]),其特点是把发动机工作过程中的压缩、燃烧和膨胀集中于一个高速旋转的轮盘的轮缘上来完成. 1999 年, Ramgen 动力系统公司进行了第一台

该新型发动机的概念验证机的点火试验. 虽然这次试验持续的时间很短,但是它却验证了这种新技术的可行性,并为这种基于激波压缩技术的新型发动机及压气机的进一步发展打下了坚实的基础.

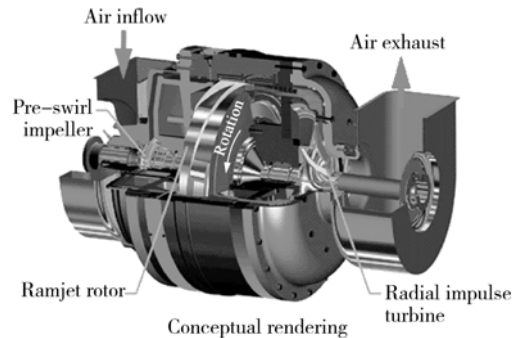


图 6 Ramgen 发动机^[8]

Fig. 6 Ramgen engine^[8]

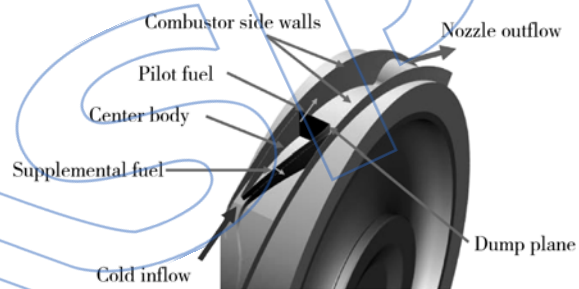


图 7 冲压发动机转子^[8]

Fig. 7 Ramjet rotor^[8]

2002 年 4 月份,美国能源部(DOE)组织了包括 DOE、美国国家航空航天局(NASA)、美国国防部(DOD)和 Ramgen 动力系统公司在内的专家组对 Ramgen 发动机技术进行了正式的回顾和评审. 专家组确认了 Ramgen 发动机技术的可行性,并提议把旋转冲压压缩转子作为 Ramgen 动力系统公司优先发展的目标之一. 这样可以在短期内,以较少的资金和较低的技术风险获得最大的技术优势和价值. 此后, Ramgen 动力系统公司把旋转冲压压缩转子作为其未来主要研究方向之一.

2002 年—2004 年 8 月, Ramgen 动力系统公司进行了旋转冲压压缩转子概念验证机的设计和试验研究工作以验证这种新型压缩系统的工作特性^[4]. 概念验证机的进口相对马赫数为 1.6,质量流量为 1.43 kg/s,压比为 2.25 : 1,压缩转子转速为 21 100 r/min,机匣半径(shroud radius)为 14.51 cm,轮毂半径(rim radius)为 12.78 cm. 设

计过程中,为了抑制旋转冲压压缩转子进气流动预进口(pre-inlet)段(见图3)附面层的影响,采用了附面层泄除措施.同时,采用热控顶部间隙控制环来最小化隔板顶部与机匣之间的间隙,从而达到控制隔板顶部泄漏流的目的.试验的目的主要是检验验证机设计的可操作性,包括起动、喘振特性、对附面层泄除和隔板顶部间隙的敏感性以及分析/设计方法预测验证机实际工作情况的能力.图8^[9]和图9^[9]给出了概念验证机和试验台装配图.初步的试验结果表明:旋转冲压压缩转子的起动和获得的峰值性能与分析模型预测的结果相一致.另外,旋转冲压压缩转子具有温和的不起动或喘振特性.由于旋转冲压压缩转子的压比较高,其性能对隔板顶部间隙的尺寸非常敏感.与此同时,Ramgen 动力系统公司还分别开展了利用旋转冲压压缩转子替代微型燃气轮机中常规压气机以提高整机效率、降低成本的研究^[10]和旋转冲压压缩转子用作大型 CO₂ 压缩机的可行性研究^[11].

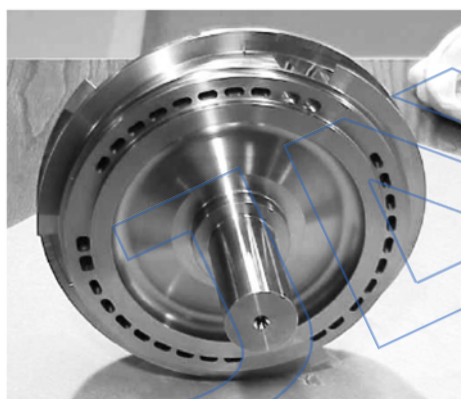


图8 旋转冲压压缩转子概念验证机^[9]

Fig. 8 Concept demonstrator of ram-rotor^[9]

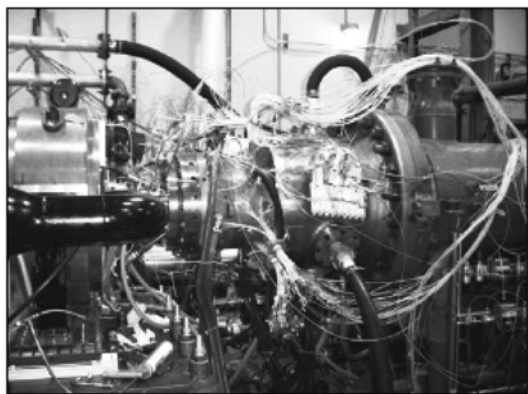
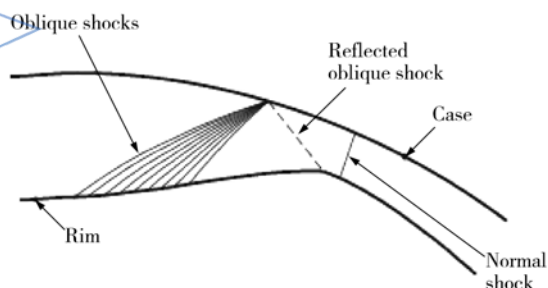


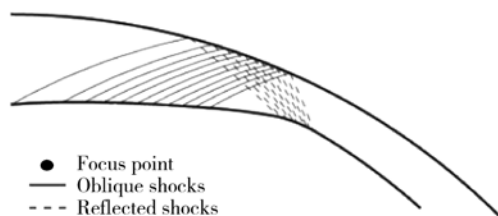
图9 试验台装配图^[9]

Fig. 9 Assembly drawing of test rig^[9]

2005—2006年,Ramgen 动力系统公司利用经过试验验证的旋转冲压压缩转子设计技术进行了来流马赫数为2.4,压比范围为8:1~10:1的旋转冲压压缩转子方案设计^[12].在设计过程中,考虑了两种波系组织方式,即汇聚激波结构(focused shock system)和分散激波结构(defocus shock system),如图10^[12]所示.为了验证两种激波系组织形式的旋转冲压压缩转子性能的优劣,Ramgen 动力系统公司分别对采用此两种激波系配置方式的旋转冲压压缩转子无黏简化模型和实际黏性模型进行了数值仿真研究,结果表明:分散激波系配置方式的旋转冲压压缩转子总体性能较优,但这种激波系配置方式会增大旋转冲压压缩转子的轮盘厚度.随后,Ramgen 动力系统公司在波音公司的喷管试验台上进行了压比为8:1的旋转冲压压缩转子的试验研究工作^[13].为了在高的叶尖速度下减小转子应力和提高其工作的耐久性,旋转冲压压缩转子试验件采用分段设计(图11^[18]),整个转子进气流道被设计成105段.分段设计转子还有一个优点就是能够在试验过程中方便地修改和更换特定的转子通道截面.同时,为了控制激波/附面层的相互干涉作用,在旋转冲压压缩转子上采用了附面层泄除措施.另外,试验过程



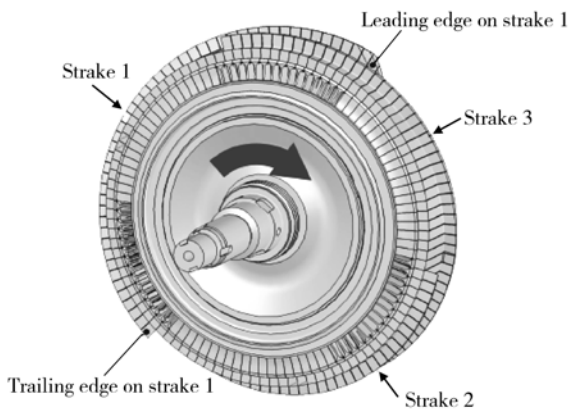
(a) 汇聚激波结构方案



(b) 分散激波结构方案

图10 高压比旋转冲压压缩转子的两种激波结构方案^[12]

Fig. 10 Shock system in ram-rotor with high pressure ratio^[12]

图 11 分段设计的旋转冲压压缩转子试验件^[13]Fig. 11 Ram-rotor with section design^[13]

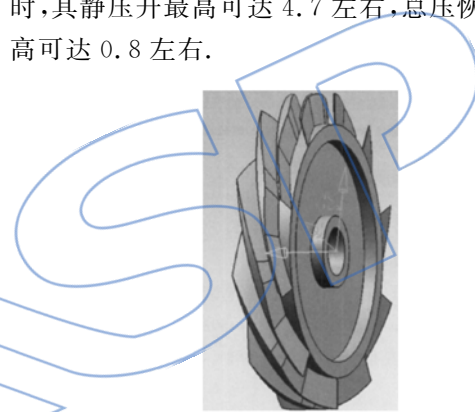
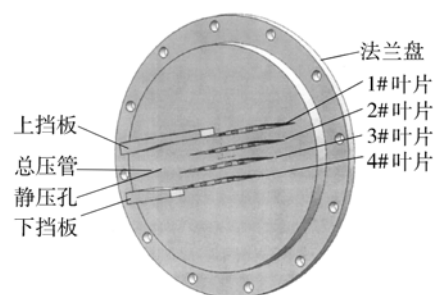
中采用锥形移动机匣控制旋转冲压压缩转子工作过程中的顶部间隙。锥形机匣的内表面覆盖耐磨材料,而隔板顶部涂上耐磨涂层。旋转冲压压缩转子工作时,利用隔板顶部擦入(rub-in)机匣内表面的耐磨材料来减小旋转冲压压缩转子顶部间隙。试验测得旋转冲压压缩转子的最大压比为 7.8:1,这也验证了数值仿真结果的可靠性。为了进一步提高旋转冲压压缩转子的性能,Ramgen 动力系统公司目前正在对旋转冲压压缩转子顶部间隙和流动控制技术等方面的研究工作。

2.2 国内研究现状

虽然国内在旋转冲压压缩转子方面的研究工作与美国 Ramgen 动力系统公司相比起步较晚,但是近年来有多家科研院所和大学在此方面开展了大量的研究工作。文献[14]在对美国 Ramgen 动力系统公司研究工作介绍、分析的基础上,提出了一种燃烧室内置于轮盘内部的新型旋转冲压发动机结构,随后对其热力循环和性能进行了理论分析,并对其运动激波的压缩性能和盘腔内的冷态流动情况进行了研究。最后对这种新型发动机在转速为 25 000 r/min 的条件下进行了验证性试验。结果表明,运动激波的压缩效果较好,能满足发动机的一般需要,而压缩性能的进一步提高有待于流道结构和相关参数的优化。旋转冲压压缩验证性试验结果与理论分析和数值模拟结果比较吻合,但是由于试验条件和测量手段及精度的限制,试验结果的定性意义要远大于定量意义。文献[15]利用量纲分析方法对旋转冲压发动机进气道的压比特性进行了分析。结果表明:旋转冲压发动机进气道的压比流量特性在低转速条件下与压气机的相似,而在高转速条件下与超声速进气道的

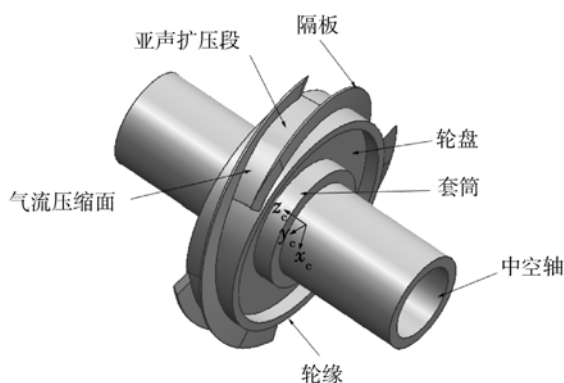
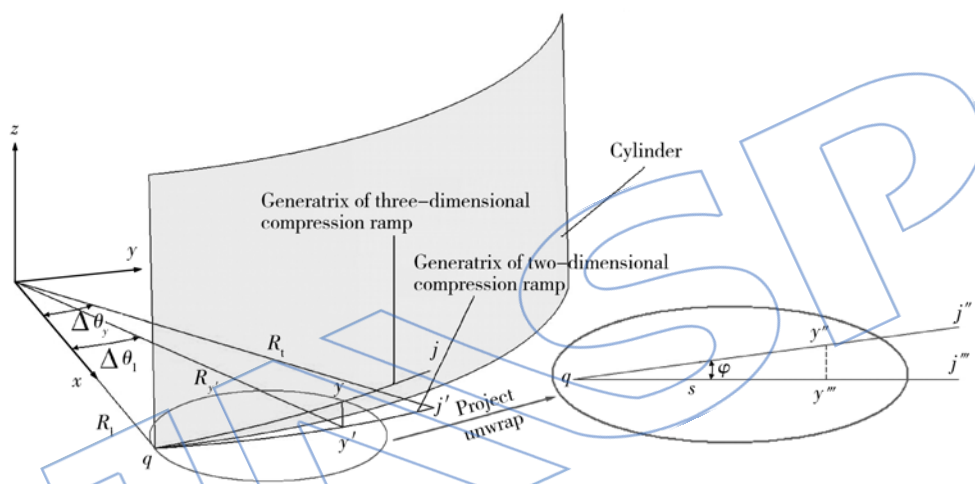
相似。文献[16]研究了转子偏心对旋转冲压发动机进气道流场的影响情况。文献[17-18]对旋转冲压发动机可能采用的高速动静混合气体轴承的性能和转子动力学特性进行了分析和试验研究。

中国科学院工程热物理研究所^[19]在分析美国 Ramgen 动力系统公司提出的旋转冲压压缩转子方案的基础上,提出了一种超声速叶轮结构——内压式冲压叶轮(图 12^[19])。这种超声速叶轮结构中气流压缩面、喉部和亚声扩压段布置在 S_1 流面,而不是像 Ramgen 动力系统公司提出的旋转冲压压缩转子那样,把气流压缩面、喉部和亚声扩压段布置在轮毂上(或称为 S_2 流面)。数值仿真和激波管试验(图 13^[20])的研究结果表明^[20-21],这种内压式冲压叶轮在进口来流马赫数为 2.0 时,其静压升最高可达 4.7 左右,总压恢复系数最高可达 0.8 左右。

图 12 冲压叶轮^[19]Fig. 12 Shock-in impeller^[19]图 13 冲压叶轮试验件^[20]Fig. 13 Test unit of shock-in impeller^[20]

大连海事大学船舶动力工程研究所^[22-23]在旋转冲压压缩转子方面也开展了较为系统的研究工作,已经完成了旋转冲压压缩转子关键技术分析^[24]、气动及结构设计、流场和性能仿真等工作^[23]。目前,正在进行全转速旋转冲压压缩转子试验件的设计和加工作。迄今为止,所开展的研究工作表明^[23,25-27]:①压缩面形状(参见图

14^[22-23]和图 15^[23])对旋转冲压压缩转子二维进气流道中的波系结构具有决定性的影响,而喉部长高比的变化对二维进气流道的性能参数和气流参数的分布影响不大.就总综合性能而言,凸曲线压缩面二维进气流道最好,直线压缩面二维进气流道次之,抛物线压缩面二维进气流道最差.②转速增加时,旋转冲压压缩转子二维进气流道的压比提高,而其总压恢复系数和动能效率降低;背压提高时,旋转冲压压缩转子二维进气流道的总压恢复系数、压比和动能效率增加,但其出口相对马赫数降低.③旋转冲压压缩转子进气流道中产生的激波系与超声速进气道中的激波系结构相类似,

图 14 中空轴旋转冲压压缩转子^[22-23]Fig. 14 Ram-rotor with hollow shaft^[22-23]图 15 气流压缩面母线设计^[23]Fig. 15 Design of compression ramp generatrix^[23]

所不同的是,进气流道中产生的激波为曲线激波(图 16),而超声速进气道中所产生的激波为斜激波.与二维进气流道中的激波系相比,三维进气流道中的激波系更为复杂,其亚声速扩压段中的气流流动具有很强的三维性,这将会直接影响旋转冲压压缩转子出口气流参数的分布情况.④随着转速的增加,旋转冲压压缩转子三维进气流道的压比不断提高,而其绝热效率却不断降低;背压的提高会使旋转冲压压缩转子三维进气流道的压比不断增加,但其绝热效率却是先增大后减小.⑤旋转冲压压缩转子的特性曲线不同于常规轴流压气机,在流量-压比-转速曲线和流量-绝热效率-转速曲线上,其特性线均垂直于流量坐标轴(图 17^[23]).

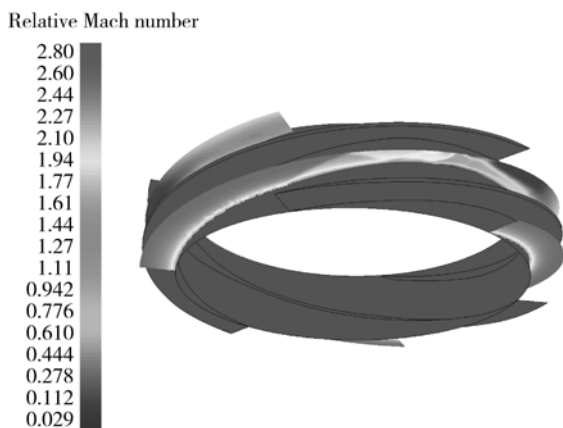
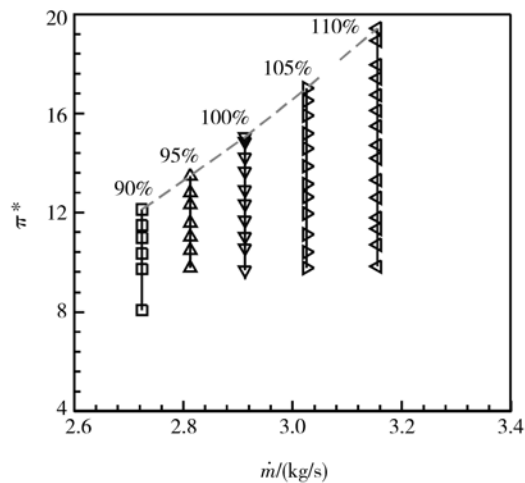
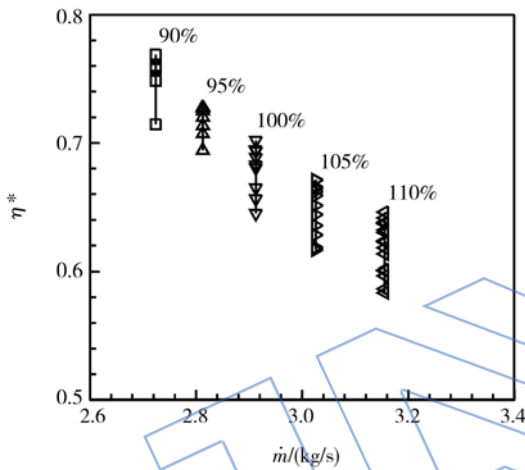


图 16 50%节距截面相对马赫数云图

Fig. 16 Contours of relative Mach number at 50% pitch section



(a) 流量-压比-转速曲线



(b) 流量-绝热效率-转速曲线

图 17 旋转冲压压缩转子特性曲线^[23]Fig. 17 Characteristic curves of ram-rotor^[23]

3 研究中存在的技术难点及进一步的研究工作

3.1 技术难点

综上所述可以看到,旋转冲压压缩转子这种新型的压缩系统由于本身所固有的优点使其在微小型燃气轮机、工业压缩机和车用涡轮增压器等领域有着广泛的应用前景.但是,其研究过程中还面临着一些关键性的技术难题.

1) 结构优化设计研究.为了提高旋转冲压压缩转子的总体性能,就需要减小其内部的流动损失.在旋转冲压压缩转子中,其流动损失主要产生于两个区域,即超声速压缩段(压缩面与喉部)和亚声速扩压段.超声速压缩段中的气流损失主要是由于激波系的存在所造成的激波损失.为了减少激波损失,就需要合理地配置超声速压缩段的

激波系结构,而激波系的结构又和气流压缩面的设计密切相关.因此,找出气流压缩面形状与激波系结构和激波损失以及旋转冲压压缩转子压缩性能之间的内在联系是一个关键的问题.亚声扩压段中由于存在结尾激波串和回流区,因此,其流动损失也是比较大的.并且由于其回流区会一直延伸到进气流道出口,这对旋转冲压压缩转子出口的气流参数分布也会造成一定的影响.因此,如何控制亚声扩压段中的流动形式,有效降低其流动损失和对出口气流参数的影响也是一个重要的问题,而亚声扩压段的结构优化设计是解决这一问题的途径之一.另外,旋转冲压压缩转子轮缘的进气流道一般比较狭窄,其隔板壁面效应在研究中也必须要考虑的问题,所以,对隔板结构进行优化设计,揭示隔板造型影响旋转冲压压缩转子流动结构和总体性能的内在规律,获得优化的隔板结构形式也是一个急需解决的问题.

2) 顶部间隙控制技术研究.单级压比高是旋转冲压压缩转子的优点之一.对于高压比的压缩系统来说,叶顶间隙泄漏流动会严重影响其总体性能.对于旋转冲压压缩转子来说也不例外.叶顶间隙的存在会严重破坏旋转冲压压缩转子内部的流动情况和激波系结构,从而造成其总体性能的下降.因此,如何使旋转冲压压缩转子在工作过程中保持尽量小的叶顶间隙是一个十分关键的问题.

3) 附面层抽吸技术研究.由于旋转冲压压缩转子进口气流的相对马赫数较高,可达 2.7 左右,其进气流道壁面对气流的摩擦将产生相当厚的附面层,并且附面层沿流向不断加厚.同时,旋转冲压压缩转子进气流道内存在多道激波,激波与附面层的相互干涉会诱导附面层分离.另外,旋转冲压压缩转子是高压比的压缩系统,沿流向的逆压力梯度比较大,这也会加速附面层的分离.附面层的存在和分离不仅会减小进气流道的通流能力,进而影响旋转冲压压缩转子的稳定工作范围,而且会造成流动损失的增加,降低旋转冲压压缩转子的总体性能.所以,为了提高旋转冲压压缩转子的性能和扩大其稳定工作范围,就需要对进气流道中的附面层进行抽吸处理.因而,研究附面层抽吸位置和抽吸量对旋转冲压压缩转子流动结构和总体性能的影响,揭示抽吸位置和抽吸量之间的内在关系,得到最佳抽吸位置和抽吸量的配置规律是旋转冲压压缩转子研究中的一个技术难点.

4) 起动问题.和超声速进气道一样,旋转冲压压缩转子也存在起动问题.由于旋转冲压压缩

转子本身结构的制约,其进气流道的喉部是几何不可调的。当旋转冲压压缩转子在低转速条件下工作时,通过进气流道进口的流量不能完全从喉部流过,从而导致进气流道中不能建立正常的激波系结构,使旋转冲压压缩转子处于不起动状态。旋转冲压压缩转子的不起动问题不仅影响其稳定工作性能和有效工作范围,而且会造成旋转冲压压缩转子喘振现象的出现。因此,不起动问题是旋转冲压压缩转子研究中要解决的一个关键。

5) 试验技术。由于旋转冲压压缩转子是一种全新的压缩系统,如何开展其试验研究面临着许多亟待解决的问题,包括旋转冲压压缩转子试验件本身的设计、制造以及支撑系统、润滑系统、起动系统和控制系统等的设计。在设计及试验过程中,试验系统的总体结构、转子强度、振动、临界转速确定以及试验时压缩转子的起动等,都是必须予以考虑的问题。

3.2 进一步的研究工作

为了进一步提高旋转冲压压缩转子的总体性能,并推动其最终步入实际应用,未来需要在以下方面开展进一步的研究工作:

1) 激波系的优化配置。由于旋转冲压压缩转子主要是依靠激波系对气流增压的,故激波系配置的好坏将直接决定着旋转冲压压缩转子总体性能的优劣。因此,为了提高旋转冲压压缩转子的总体性能,就需要对其内部的激波系进行优化配置,构建适应工况条件变化的旋转冲压压缩转子激波系配置原则。

2) 流动控制技术研究。从上述分析和已经开展的研究工作可知,旋转冲压压缩转子内部的流动较为复杂,存在着诸如激波/附面层相互干涉作用、顶部泄漏流动和大范围的气流分离区等,这些都会使旋转冲压压缩转子流动损失增加、总体性能下降。因此,未来需要深入开展包括参数优化匹配、附面层抽吸和顶部间隙流动控制在内的综合流动控制技术研究,以优化旋转冲压压缩转子内部的流动结构,提高其性能。

4 结束语

通过以上分析可知,旋转冲压压缩转子作为一种基于激波压缩技术的新型压缩系统,具有单级压比高、结构简单紧凑、体积小、质量轻、维修方便等优点。当然,作为一种新型的压缩系统,除了具有突出的优点之外,其本身也面临一些问题和困难,例如,流量不大、转速较高导致对轴系支撑

要求较高,泄漏密封难度高于常规压气机等。但总体来说,这种新型压缩系统本身所固有的突出优点使其在飞行状态比较固定的小型航空飞行器推进系统、工业压缩机、车载和中小型船舶动力系统以及分布式能源等领域有着令人期待的应用前景。同时,对这种新型压缩系统的深入研究也可以为我国现有压气机的改进和未来高性能压气机的设计研发提供一个新思路和发展方向。

参考文献:

- [1] 张恩和. 对我国军用航空发动机发展的思考[J]. 航空发动机, 2001(3): 1-3.
- [2] 于达仁, 刘金福, 徐基豫. 面向 21 世纪的燃气轮机技术的发展[J]. 燃气轮机技术, 2001, 14(1): 14-21, 53.
YU Daren, LIU Jinfu, XU Jiyu. Facing the development of GT technology in the 21th century[J]. Gas Turbine Technology, 2001, 14(1): 14-21, 53. (in Chinese)
- [3] 林汝谋. 工业燃气轮机发展的关键技术[J]. 热力发电, 1999(1): 26-28.
LIN Rumou. Key development of industrial gas turbine [J]. Thermal Power Generation, 1999(1): 26-28. (in Chinese)
- [4] Lawlor S P, Hinkey J B, Mackin S G, et al. Supersonic compressor stage design & test results[R]. IMECE 2004-59914, 2004.
- [5] Draper R, Steele R. Design of diffuser for high Mach and high swirl applications [EB/OL]. 2003. <http://www.cl-emonson.edu/scies/UTSRPeerReview/Proceeding20content/Poster20session/Poster-Draper.pdf>.
- [6] Broichhausen K D, Ziegler K U. Supersonic and transonic compressors: past, status and technology trends [R]. ASME Paper GT2005-69067, 2005.
- [7] Victor D B. 485-kW turbine rated 35% simple cycle at 1700F firing temperature[J]. Gas Turbine World, 2002, 32(5): 13-16.
- [8] Victor D B. Adapting ramjet technology to 3-to-9-MW ramgenset designs[J]. Gas Turbine World, 2002, 32(3): 16-19.
- [9] Ramgen Power Systems. Low-cost, high-efficiency CO₂ compressor[EB/OL]. 2007-12-05. http://www.carbon-council.org/pdf/presentations/technologies_baldwin.pdf.
- [10] Steele R, Baldwin P, Kesseli J. Insertion of shock wave compression technology into micro turbine for increased efficiency and reduced costs[R]. ASME Paper GT2005-68203, 2005.
- [11] Lawlor S P, Baldwin P. Conceptual design of a supersonic CO₂ compressor[R]. ASME Paper GT2005-68349, 2005.
- [12] Grosvenor A D, Brown P M, Lawlor S P. Design methodology and predicted performance for a supersonic compressor stage[R]. ASME Paper GT2006-90409, 2006.
- [13] Grosvenor A D, Taylor D A, Bucher J R, et al. Measured

- and predicted performance of a high pressure ratio super-sonic compressor rotor[R]. ASME Paper GT2008-50150, 2008.
- [14] 王云. 新概念旋转冲压发动机基础性探索研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- WANG Yun. Primary research of new conceptive internal-rotor burnt rotating ramjet[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [15] 于达仁, 何保成, 吕晓武, 等. 旋转冲压发动机进气道压比特性分析[J]. 推进技术, 2008, 29(3): 329-333.
- YU Daren, HE Baocheng, LÜ Xiaowu, et al. Characteristics analysis of pressure ratios for rotated ramjet inlets[J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(3): 329-333. (in Chinese)
- [16] 田新, 刘占生. 旋转冲压发动机进气道流场及气流对转子的作用力研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(Suppl.): 32-35.
- TIAN Xin, LIU Zhansheng. Research on the flow field of rotating ramjet inlet and the airflow force on the rotor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(Suppl.): 32-35. (in Chinese)
- [17] 张广辉, 刘占生. 旋转冲压发动机高速动静混合气体轴承性能分析[J]. 推进技术, 2009, 30(5): 610-617.
- ZHANG Guanghui, LIU Zhansheng. Performance analysis of high-speed hybrid gas bearings for rotating ramjet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(5): 610-617. (in Chinese)
- [18] 张广辉, 刘占生, 章正传. 旋转冲压发动机高速动静混合气体轴承转子动力学特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(9): 74-78.
- ZHANG Guanghui, LIU Zhansheng, ZHANG Zhengchuan. Dynamic behavior of a high-speed hybrid gas bearing-rotor system for a rotating ramjet[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(9): 74-78. (in Chinese)
- [19] 肖翔, 赵晓路, 徐建中. 高压比旋转冲压叶轮研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(5): 759-762.
- XIAO Xiang, ZHAO Xiaolu, XU Jianzhong. A new kind of high performance shock-in impleller[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(5): 759-762. (in Chinese)
- [20] 肖翔, 刘锡阳, 赵晓路, 等. 对转冲压压气机冲压叶栅实验研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(11): 1837-1840.
- XIAO Xiang, LIU Xiyang, ZHAO Xiaolu, et al. The cascade experimental investigation of counter-rotating rampressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(11): 1837-1840. (in Chinese)
- [21] 肖翔. 对转冲压压气机冲压叶轮内部流动分析研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- XIAO Xiang. The aerodynamic design and analysis of counter-rotating compressor's shock-in impeller[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [22] 钟兢军, 韩吉昂. 基于激波压缩技术的中空轴旋转冲压压缩转子: 中国, ZL200710157305. 3[P]. 2009-12-16.
- [23] 韩吉昂. 旋转冲压压缩转子进气流道数值仿真及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- HAN Ji'ang. Numerical simulation and performance research of flow-path in a ram-rotor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [24] 韩吉昂, 钟兢军, 卜方. 旋转冲压压气机压缩转子技术分析 & 展望[J]. 飞航导弹, 2007(7): 52-56.
- [25] 韩吉昂, 严红明, 钟兢军, 等. 旋转冲压压缩转子二维进气流道数值研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 1054-1060.
- HAN Ji'ang, YAN Hongming, ZHONG Jingjun, et al. Numerical research of two-dimensional flow-path in ram-rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 1054-1060. (in Chinese)
- [26] 韩吉昂, 钟兢军, 严红明, 等. 旋转冲压压缩转子三维进气流道数值研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(5): 1079-1088.
- HAN Ji'ang, ZHONG Jingjun, YAN Hongming, et al. Numerical research of three dimensional flow-path in a ram-rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(5): 1079-1088. (in Chinese)
- [27] 韩吉昂, 孙鹏, 钟兢军, 等. 旋转冲压压缩转子中压缩面的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(2): 227-230.
- HAN Ji'ang, SUN Peng, ZHONG Jingjun, et al. Numerical research of compression ramp in a ram-rotor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(2): 227-230. (in Chinese)