

内燃波转子增压燃烧发动机技术分析

Technical Analysis of Wave Rotor Combustor Supercharged Engine

■ 郑仁传 聂赵龙 李建中 巩二磊 金武 / 南京航空航天大学

将内燃波转子替换燃气涡轮发动机燃烧室，利用波系和等容燃烧可以显著提高热力循环效率，无须增加涡轮前温度即可提升发动机性能。该装置不仅展现了增压燃烧在提高飞行器动力系统性能方面的巨大潜力，而且已通过多次试验验证，具有广阔的应用发展前景。

内燃波转子是一种融合了可燃混合气预增压、高循环热效率以及等容燃烧技术的新型燃烧系统，具备自增压的能力。如图1所示，内燃波转子燃烧室是由一系列围绕轴旋转的固定容积通道组成，形态类似于一个圆柱形的鼓状转子。在高速旋转过程中，单个通道燃烧室周期性地与静止端板上的进排气端口相连通，产生激波、压缩波、膨胀波等复杂波系，通过这些波系的相互作用实现能量的快速交换，端板上的端口控制了燃烧室的进排气流动过程。与传统发动机相比，内燃波转子发动机的熵增减少，输出功率和压力增益显著提高。此外，多通道的时序旋转工作模式，克服了脉冲爆震发动机阻力损失大、非定常输出推力等缺点，充分发挥了波转子增压技术和爆震燃烧的高热循环效率优点。这一技术已被认为满足美国国防预先研究计划局（DARPA）安静超声速空中平台（QSP）计划要求，是用于降低超声速巡航飞行过程中油耗的一种替代途径，能满足军民远程超声速飞机的需求。

工作原理

将波转子沿通道中径面展开，对内

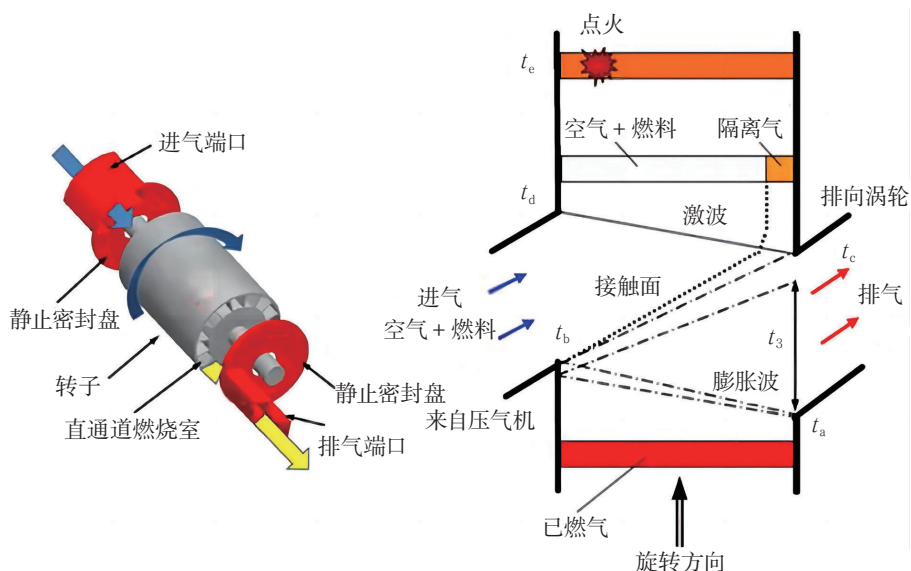


图1 典型内燃波转子结构及其复杂波系特征

燃波转子的工作过程做简单的划分，如图2所示，主要包括以下几个阶段：在填充结束后，通道两端封闭，此时通道右端为可燃混合气，左端为纯净空气，左端纯净空气作为隔离气，可以有效避免回火；随后，通道内的可燃混合气被位于出口端的点火装置点燃，形成向左传播的火焰，火焰锋面之后的压力和温度迅速升高，伴随着激波与火焰相互作用，完成定容燃烧过程；燃烧完成后，出口端口打开，产生一系列膨胀波促使高温燃气排出，这是内燃波转子的膨胀过程；通道内的高温燃气

充分膨胀后，进气端口打开，开始重新填充混合气，混合气填充包括燃料/空气可燃混合气和新鲜空气，新鲜空气填充主要是用来隔离燃料/空气可燃混合气和燃烧后的高温燃气，避免热自燃，从时序图可以看出，进气过程和排气过程存在重叠，这需要精准控制端口角度和位置；由于出口突然关闭，会形成一道向左传播的压缩波，对通道内的气体进行预压缩，这是内燃波转子的预压缩过程；当预压缩波传播到左端时，进口端口关闭，填充过程结束，开始进入新的循环。通过以上几个阶

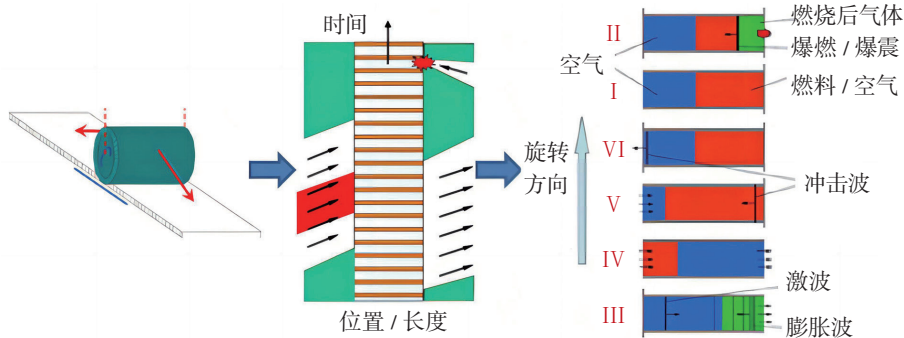


图2 内燃波转子工作原理

段的划分，内燃波转子展现了独特的工作模式，通过精确的波系设计和时序控制，能够有效利用非定常过程实现能量的高效转换。

波转子分类

根据气流在通道内流动的方向，内燃波转子可以分为轴向流内燃波转子和径向流内燃波转子。在轴向流内燃波转子通道中，气流方向沿着旋转轴方向，而在径向流内燃波转子中，气流方向沿着与转轴垂直的方向，因此具有更紧凑的结构。径向波转子在21世纪初期提出，旨在应用于500kW级以下的动力装置。

径向流内燃波转子的设计使得工作流体垂直于旋转轴，具有更紧凑的结构，从而提供了比传统波转子更高的功率密度，因此大大减轻了发动机质量。考虑到完整的发动机结构，可以将离心压气机嵌入到波转子的中心，形成紧凑发动机，并且由3个运动部件（压气机、旋转盘和涡轮）组成，具有有限的轴系，降低了发动机维修复杂性和总成本，其集成概念如图3所示。发动机的功率密度与特征长度成反比，径向流波转子沿发动机轴向长度紧凑，因此径向结构单位质量下能够提供更大的功率。此外，径向结构可以利

用离心力大大改善扫气过程。在径向结构中，通道形状可以设计成弯曲通道，利用流体在弯曲通道内角动量的变化提取更多的轴功，甚至实现自驱动。此外，可以在波转子出口加上一级涡轮机构来提高对尾气的利用率，增大输出功率。

研究历程

早在20世纪50年代，国外就已经提出了内燃波转子的概念，并进行了大量研究，前期研究集中在企业和航空科研机构，后期主要在高校中

开展研究。

1955年，美国寇蒂斯-莱特公司首次对内燃波转子开展研究，利用气体动力学理论分析了波转子中的恒定体积燃烧过程，并申请了相关专利。同时期，美国康奈尔航空实验室也进行了相关的研究，探索了内燃波转子中的气体流动损失、间隙泄漏、通道渐开闭以及瞬态燃烧等行为。1956—1959年，美国GE公司设计、制造并测试了1台内燃波转子验证机，研究显示该发动机的总质量和成本可以显著减少，耗油率可降低15%。

1989—1994年，瑞士ABB集团对波转子进行了研究，第一阶段完成了外燃波转子发动机的研究，在第二和第三阶段，分别完成了内燃波转子单通道和多通道试验，试验采用空气/丙烷混合气，研究表明排出的燃气中NO_x的含量明显下降，同时验证了采用波转子技术实现等容燃烧的可行性。由于在研究中暴

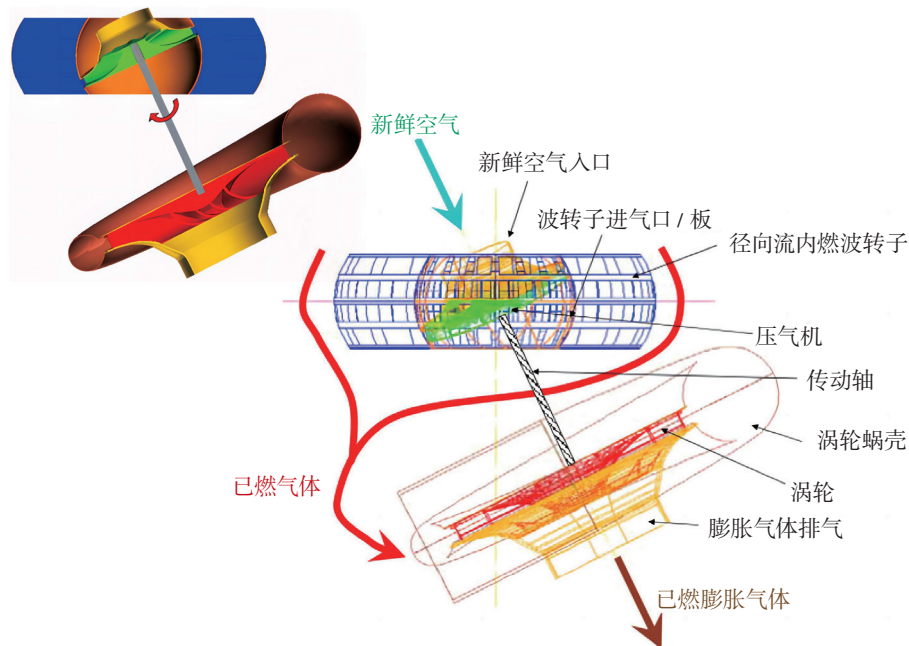


图3 径向流内燃波转子集成涡轮机械

露出一系列的问题，该研究于1994年终止。

1994年之后，美国国家航空航天局（NASA）针对内燃波转子作为燃气涡轮发动机未来核心机的可能性进行了研究。以501-KB5S发动机作为基准，通过技术验证发现，内燃波转子的应用可使压气机级数减少2~3级，轴功率提升17.7%，耗油率下降10.5%。通过热力循环模型和性能计算，展示了应用内燃波转子后，燃气涡轮发动机的热循环效率提高了20%，耗油率降低了17%。数值模拟研究进一步证实，波转子在相同温升比下能实现更高的压力增益，并提供更均匀的出口流场和温度分布，证明了其在燃气涡轮发动机应用中的优势。

2009年以来，美国普渡大学对采用爆震和接近爆震的内燃波转子进行了数值计算和试验研究。2017年，在波转子转速2100r/min和进气流量4.54kg/s的条件下进行了数百次试验，得到了超过30个成功的测试数据，包括一个3s的运行数据。试验结果展示了良好的燃烧特性，没有出现回火现象，观察到了近乎爆燃的快速燃烧状态，通过对进出口压力的监测，间接表明净压力增益非常高，进一步阐明了内燃波转子作为压力增益燃烧室的可行性。

近年来，南京航空航天大学也开展了内燃波转子技术的研究，主要对通道内气体的非定常燃烧特征、点火装置的射流特性，以及通道内的波系和火焰传播过程等方面进行了相关研究，建立了横移射流单通道、旋转阀式单通道、旋转双通道等试验系统，于2020年建立了多通道内燃波转子样机系统，如图4所示。

关键技术

21世纪以来，关于内燃波转子的研究取得了不少进展，但要实现工程应用，仍需在一系列关键技术领域开展深入研究，如非定常流动与混合气形成技术、高效点火匹配技术、增压强化燃烧技术、低损失过渡段匹配技术以及超紧凑波转子技术等。

非定常流动与混合气形成技术

内燃波转子工作过程处于高速旋转状态，波转子通道依次经过不同的端口，因此其流动过程表现出显著的非定常流动特性。在实际操作中，混合气通过燃料喷嘴喷入进气端口与来流混合，以部分预混状态在波转子通道内燃烧。燃烧后的气体在通道内旋转至排气端口时产生膨胀波，通过排气端口排出。新鲜混合气随后填充波转子通道，形成物质间断面，向前移动直至排气端口关闭，这时气流滞止形成预压缩波。在进气端口关闭后，混合气在获得冷态压力增益后点燃，启动燃烧过程。这种冷态预压缩能够提升热力循环的初始压力，进而有效

增加整体热效率。然而，由于发动机工作状态、波转子转速、端口渐开闭、泄漏等多因素共同影响，工程上实现理想的流动组织是不现实的，因此掌握非定常流动特性的影响因素及规律，对内燃波转子设计和工程应用具有重要意义。

高效点火匹配技术

内燃波转子的设计使其转子轴每旋转一圈，周围布置的众多波转子通道均需经历至少一个完整的循环，每个循环都必须进行一次有效的点火。鉴于波转子可能包含数十个甚至更多的通道，这就对点火器提出了极高的点火频率和足够大的点火能量的双重要求，传统的火花塞点火方式难以满足这样的需求。目前，适用于内燃波转子点火的技术包括连续热射流点火、等离子点火和自给式点火等。其中，热射流点火是一种广泛采用的方法，它不仅需要确保有足够的点火能量，而且还要保证良好的湍流掺混效果，以促进快速燃烧。此外，为了适应内燃波转子试验系统的安装要求，热射流

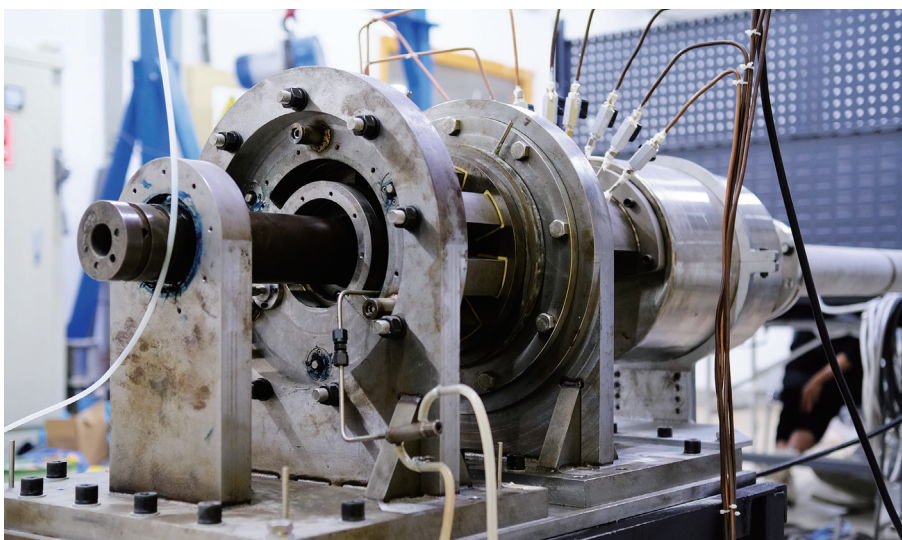


图4 南京航空航天大学多通道内燃波转子试验平台

点火器的设计应当紧凑、结构简单且质量轻。同时，考虑到预燃室冷却的需要，在内外壁之间设置冷却通道是必要的；并且，为了适应不同的试验条件，喷管的拆卸与替换功能也是必需的，这要求根据具体工况选择合适的尺寸和规格。因此，如何设计一款点火频率高、湍流掺混效果强和尺寸小、质量轻的点火器是内燃波转子点火技术的关键。

增压强化燃烧技术

在内燃波转子的工作过程中，燃烧过程进行得越剧烈，越能实现较好的总体性能，包括更高的压力增益、更快的火焰传播速度等。热射流点火在波转子燃烧室内点燃可燃混合气后，形成初始火焰，该火焰在复杂波系的作用下向周围扩散，形成紊流火焰面，进而诱发更快的火焰传播。这种火焰面的扩展和紊流火焰面的形成，以及激波-火焰相互作用，促进了“热点”产生和爆震燃烧，实现高效燃烧模式。为强化燃烧模式，通道内常设置扰流片，这些扰流片通过在火焰传播路径上引入流动变化和旋涡，显著增加了湍流度，成为产生湍流的主要源头。这种湍流作用下火焰放热面积迅速增加，导致火焰传播速率和化学反应速率的快速提升。然而，扰流装置同时也带来了一些挑战，如减小了内燃波转子稳定工作的填充速度范围，并增加了进气阻力。因此，如何在不增加流动损失的前提下，增强通道内的燃烧强度和火焰传播速度，这要求对扰流装置的设计进行精细调整，以及对燃烧动力学和火焰传播机理有深入的理解和掌握，以确保内燃波转子的增压燃烧过程既高效又稳定。

低损失过渡段匹配技术

将内燃波转子整合进基准发动机后，为了确保与发动机的兼容性，基准发动机的核心部件需进行适当的调整。在采用内燃波转子的情况下，基准发动机的压气机、燃烧室和涡轮三大主要部件中，通常选择保留压气机和涡轮的设计不变，这种配置已被验证能够优化波转子发动机的总体效率、比功和耗油率等关键性能指标。然而，传统燃气轮机的这三大部件通常采用全环结构设计，而波转子的进出口采用部分环形结构，这就需要在两者之间实现一个合理的过渡。波转子固有的非定常流动特性使得过渡通道内的流动规律十分复杂，过渡段的特定结构设计也可能导致气流分布不均和出口流场不均衡，从而影响到压气机或涡轮的稳定运行。此外，考虑到过渡管道设计的复杂性及其对低压力损失运行的需求，优化过渡段结构、改善其内部流动特性、降低总压损失便成了实现低损失过渡段匹配技术的关键。因此，在将内燃波转子应用于现代航空发动机的过程中，确保波转子与发动机间过渡段的有效匹配至关重要。

超紧凑波转子技术

超紧凑型燃气涡轮发动机被视为小型无人机、微型无线传感器等设备的理想动力源，同时也能在飞机和其他交通工具上实现高密度、分布式的冗余发电。然而，超紧凑型燃气涡轮发动机最大的局限在于其热力循环效率相对较低，这主要是由于微尺度影响导致部件效率低下，例如，压气机的等熵效率仅为40%。径向流内燃波转子以其简单的二维结构特征，适合与超紧凑型

燃气轮机结合使用。气流的径向组织有助于减轻发动机的总质量，提高功重比。尽管波转子在改善推进系统性能方面已经获得了广泛的认可，但将其应用于超紧凑推进系统仍面临许多特殊挑战。这些挑战主要体现在微尺度条件下，传统的流体机械理论不再适用，流体的黏性、泄漏、热损失、结构表面的粗糙度等因素的影响更为显著。因此，深入研究微尺度下内燃波转子的理论机制变得尤为重要。此外，常规的机械加工方法无法满足微尺度径向流波转子的制造需求，需要开发非传统的微尺度精密加工技术。因此，关于超紧凑波转子技术的研究成为了内燃波转子研究的一个重点领域，有助于推动超紧凑燃气轮机技术的进一步发展和应用。

结束语

作为增压热力循环系统，内燃波转子已成为显著提升航空发动机性能的有效途径之一。可用于包括涡轴、涡桨、涡喷和涡扇发动机等多种类型的航空动力装置，代表了动力技术的一大飞跃。对解决现役动力装置推重比低、耗油率高等技术瓶颈具有重要的军事和工程意义。近几年来，内燃波转子技术的成熟度显著提高，预计未来能够与各种燃气轮机系统有效结合并相互补充，这种融合不仅可以降低发动机的整体复杂度和减轻质量，还能在提高发动机整体性能的同时，推动新型动力装置的发展，为航空动力技术带来革命性的进步。

航空动力

（郑仁传，南京航空航天大学，博士研究生，主要从事内燃波转子增压燃烧技术研究）