

航空发动机多源能量提取技术浅析

Analysis of Multi-Source Energy Extraction Technology for Aero Engine

张翠珍 王奉明 袁善虎 牟园伟 / 中国航空发动机研究院

随着飞机多电化发展和高能武器的兴起，飞机对发动机提供的能量需求快速增长，航空发动机除了要满足飞机的推力需求之外，还需要为飞机提供大量额外的能量输出，因此航空发动机多源能量提取也成为亟待发展的关键技术。

自 21 世纪以来，多电飞机的概念促使飞机电气化管理的发展进程加快，航空业设想利用电力系统取代原有的液压、气压和机械系统，通过电能的分配、传递和控制，实现飞机环境控制、燃油、液压、控制和辅助动力等二次能源应用系统的综合管理（见图 1），以减轻系统质量、降低各系统的冗余程度和能量消耗，释放机上空间，提高飞机的可靠性和维修性，这无疑加大了飞机对发动机的能量需求。此外，随着作战形式和武器装备的发展，激光武器、微波武器等新概念大功率高能武器的出现，对发动机提出了兆瓦级电能的需求，使得飞机对发动机能量提取量级迈升了一个新的台阶，飞机对发动机提供的能量需求在目前和可预见的未来持续呈现几何级数的增长。因此，航空发动机作为飞机的主能量源，在为飞机平台提供必需的飞行动力之外，需采用能量提取技术，以满足飞机其他系统日益增长的能量需求。

从能量角度分析，航空发动机作为一种热机，其能量来源本质为燃油化学能。以涡扇发动机为例，空气通过压气机增压，在燃烧室与燃油混合燃烧将燃油的化学能转化为气体的热能，并通过涡轮实现部

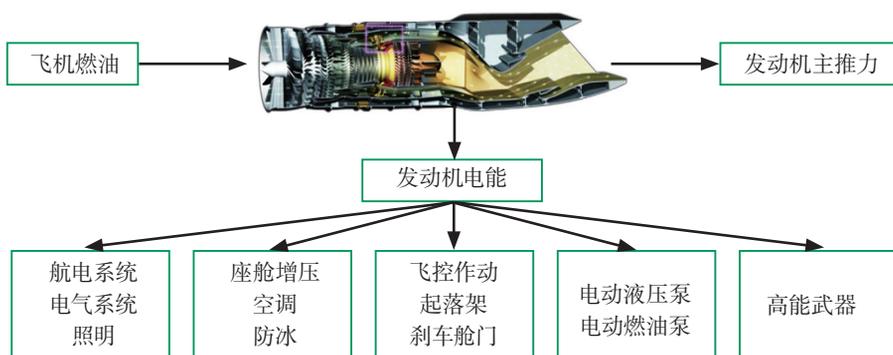


图1 航空发动机主要能源结构

分气体热能向机械能的转换，继而通过喷管实现气体热能向动能的转换。目前，航空发动机可提取的能量形式为轴功率和热能两类，具体的能量提取技术包括高压轴功率提取技术、高低压轴功率提取技术、半导体热电转换技术、磁流体热电转换技术，以及热力循环类热电转换技术。

高压轴功率提取技术

目前，航空发动机的主流类型为双转子涡扇发动机，其功率提取主要依靠发动机高压轴带动中央传动机构实现对外轴功率的输出（见图 2），再通过附件连接和发电机等装置，实现发动机机械能向电能的转化，从而为发动机附件系统和飞机其他系统供电。发动机的高压轴功率提

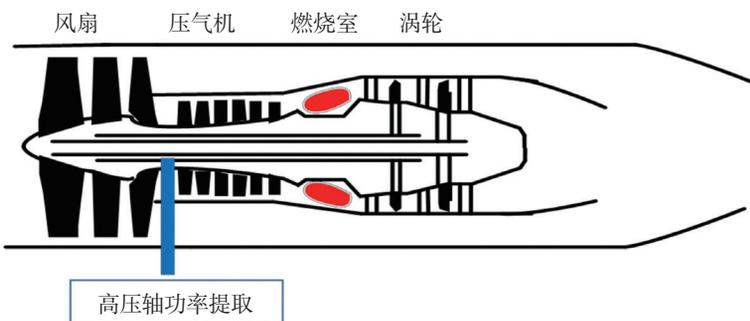


图2 发动机高压轴功率提取示意

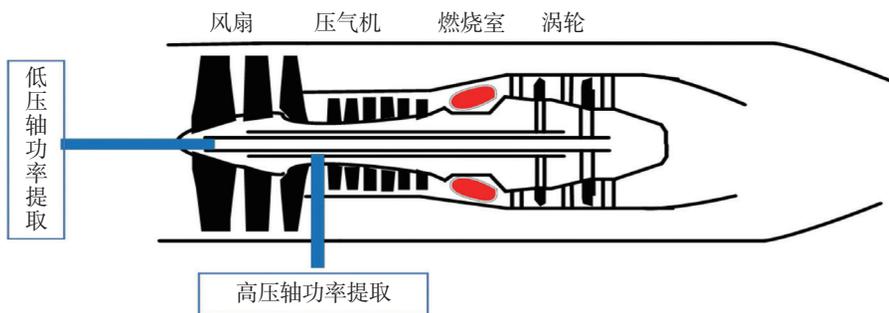


图3 发动机高低压轴功率提取示意

取装置主要包括中央传动齿轮（主动齿轮和从动齿轮）、承力框架和功率输出轴。

单独从发动机高压转子提取轴功率的能量提取方式是目前传统发动机进行轴功率提取的常规方法，技术成熟度很高，获取电能的量级为百千瓦级。但该种能量提取方式存在不足，容错能力低，发生故障后能量提取中断，将无法再为发动机和飞机的其他功率需求装置供能，且提取能量受限，继续增加提取轴功率的量级，将导致发动机稳定性急剧降低、涡轮前温度显著提高、传动装置尺寸大，以及发电机质量大等问题，依靠现有的材料和技术很难在有限的空间内设计出安全可靠的能量传动链。

高低压轴功率提取技术

在保证发动机推力稳定输出的基础上，为了进一步增大发动机轴功率的提取量，满足发动机附件和飞机系统日益提高的功率需求，发动机高低压双轴功率提取技术得到发展。该种轴功率提取方式分别从发动机高压轴和低压轴出发，通过齿轮箱和发电机实现轴功率向电能的转化（见图3）。发动机高低压双轴功率提取装置主要包括中央传动齿轮（主动齿轮和从动齿轮）、承力框架、功

率输出轴、离合装置和发电机等。

相比于高压轴功率提取方式，高低压双轴功率提取技术可通过离合装置实现低压轴功率提取开关，形成发动机轴功率的梯级提取；同时，通过紧凑的结构与较小的质量代价，实现将发动机轴功率输出从当前的百千瓦级提升到兆瓦级，满足发动机和飞机附件能量需求，实现激光武器作战。

鉴于高低压轴功率提取的技术优势，美国国家航空航天局（NASA）在混合热效率核心机（HyTEC）项目中，将高低压轴功率提取技术列为关键技术，并提出将功率提取比例从当前5%的水平提高到10%~20%；罗罗公司在嵌入式起动机发电机（E2SG）计划中将高低压双轴

发电纳入研究内容，通过将嵌入式起动机发电机安装在一台阿杜尔军用发动机的低压轴和高压轴上进行高低压功率提取试验验证；GE公司在F110发动机上成功验证了高低压轴功率提取技术的可行性，提取250kW高压轴功率、750kW低压轴功率，实现了兆瓦级轴功率的提取。

为了实现大功率提取，高低压轴功率提取技术亟需解决的问题包括大功率提取状态下发动机部件调节及总体性能匹配、发动机的控制与稳定性、大功率电机与发动机耦合振动、大功率机载发电机等。

半导体热电转换技术

半导体热电转换技术采用一种能够直接实现热能与电能相互转换的功能材料，使用基于该种材料的热电发电器件可以利用温差发电，实现航空发动机热能向电能的直接转换，半导体热电转换技术的原理如图4所示。基于塞贝克（Seebeck）效应，当热电发电器件的上下端分别处于高温区和低温区，器件上下端存在温差时，热能从高温端向低温端传递，引发N型和P型热电偶臂中载子

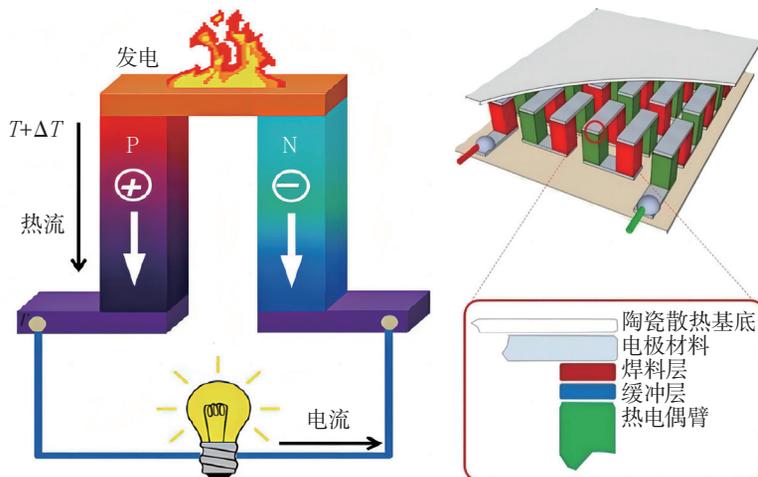


图4 半导体热电转换原理

的定向迁移，产生热电势，实现热能向电能的转化。半导体热电发电器件的基本结构主要包括P型热电偶臂、N型热电偶臂、电极、缓冲层、上陶瓷基底和下陶瓷基底等。

相比于轴功率提取技术，半导体热电转换技术无需运动部件，热电发电器件结构简单，不需要流动介质，具有无噪声、易控制和易维护的技术优势。航空发动机作为一个多热源体，燃烧室热壁面、尾喷管热壁面、冲压发动机热壁面等均可以作为热电发电器件的热端。采用热电转换技术，在实现航空发动机热能向电能进行余热回收再利用的同时，也可以对热端进行原位冷却，实现高温部位冷却的目的。

鉴于热能向电能直接转换的技术优势，半导体热电转换技术广泛应用于汽车、船舶等交通领域的余热回收、工业余热回收发电、太阳辐射热/地热/海洋热等自然热发电、太空探测等，而在航空发动机上的研究才刚刚兴起。欧盟在用于21世纪中期航空发动机的超低排放创新技术项目中提出了发动机余热回收的概念，欲结合全新的设计理念、发动机各部件的改进和废能回收再利用等技术，在2050年实现发动机效率超过60%。欧洲宇航防务集团已开展具有能量回收利用功能的飞机自供电传感器研究，并以无线传输的方式将数据提交到系统监控装置；美国陆军研究实验室也针对“影子”战术无人机开展了热电转换技术的研究。

半导体热电转换技术在航空发动机上未得到充分应用的原因主要包括：航空发动机是一种高度复杂和精密的热力机械，由于对性能和推重比

的极致追求，航空发动机对附加物的控制十分严格，以避免对发动机结构强度和气动等的稳定性造成影响；传统热电器件的转换效率较低，所能提供的电能有限，据报道，目前商用热电器件的转换效率一般不超过10%，单位功率约100 W/kg，一方面受限于热电材料的性能，另一方面也与热电器件的结构和加工工艺相关；现有热电器件的耐温性和可靠性较差，目前，普通商用热电器件主要基于碲化铋基热电材料，并通过普通焊接工艺加工而成，使用温度不超过300℃，由于在航空发动机内实际应用时要面临复杂的高温高压环境，因此要求热电材料与发电器件具有耐高温、耐腐蚀和耐冲击性等高综合性能；需考虑热电转换功能结构的布局，尽量在不影响航空发动机总体性能的基础上，提供能为发动机直接利用的高品质电能。

为了推进半导体热电转换技术在航空发动机上的应用，需要解决的关键技术包括高性能热电材料的制备与性能优化、高综合性能热电发电器件的加工与性能优化、高综合性能热电发电器件与航空发动机集成技术等。

磁流体热电转换技术

磁流体（MHD）热电转换技术也是一种可以实现热能向电能直接转换的发电技术。根据电磁感应原理，通过导电流体与磁场相对运动而发电，其工作原理如图5所示。通过高温流体中加入电离能较低的化合物，利用其产生的高温等离子体，高速穿越置于强磁场的发电通道，形成切割磁力线的运动产生电流，从而将高温流体的热能转换为电能。

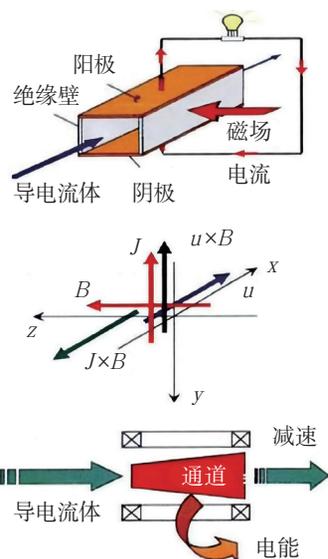


图5 磁流体发电原理

最简单的磁流体发电机包括线圈、发电通道、电极和导电流体等。

此种发电方式与普通发电原理一致，但不同的是磁流体发电需要流体温度高、可电离，因此磁流体发电技术在航空发动机的应用部位包括冲压发动机进气道、燃烧室后方以及高超声速飞行器表面等，具有热效率高、磁流体本身转化效率可达20%左右、结构紧凑简单、不需要旋转部件、发电起停动作快等技术优势。

磁流体热电转换技术作为一种新型能量转换技术，自20世纪中期便受到国内外大量研究学者的青睐，研究成果覆盖磁流体动力学、等离子体物理、高温技术和材料科学等多领域。考虑到磁流体发电的前提是来流高温且可离子化，不需要旋转部件，而高速发动机来流温度高且常见的冲压发动机无旋转部件能够提取轴功率，因此磁流体热电转换技术常见于高超声速领域。俄罗斯学者率先提出了一种带有能量旁路的冲压发动机（AJAX），通过置于燃

烧室前的磁流体发电通道和置于燃烧室后的磁流体加速通道实现工质热能与电能的直接交换。NASA提出了一种磁流体涡轮组合发动机概念，通过置于涡轮发动机进口的磁流体进气通道和置于涡轮发动机出口的磁流体加速通道，将涡轮发动机的速度从马赫数 (Ma) 3 提升到 $Ma7$ 。

受限于当前技术水平，目前磁流体热电转换技术处于数值仿真和试验验证阶段，特别是对来流马赫数较低的常规涡扇发动机来说，气体不能电离，需要借助金属化合物才能达到电离效果，因此提高了发动机的复杂程度和成本，对发动机原有性能的影响也未可知。

为了提高磁流体热电转换技术的成熟度，当前还需要攻克的关键技术包括磁流体发电机技术、磁流体发电通道设计技术、气体电离技术、高效磁流体发电系统的优化设计、磁流体发电系统与发动机匹配技术等。

热力循环类热电转换技术

除了直接热电转换技术外，还有一类基于热力循环的热电转换技术，通过热力循环将热能转换为机械能，再驱动发电机进行发电，实现热能与电能的转换，主要包括基于斯特林循环的热电转换技术、基于朗肯循环的热电转换技术和基于布雷顿循环的热电转换技术，如图6所示。

基于斯特林循环的热电转换技术性能虽然最优，转换效率高达60%左右，单位功率为100 ~ 200W/kg，但存在制作成本高、密封工艺难、可靠性差等问题，目前仍处于理论研究阶段。基于朗肯循环的热电转换技术虽然成熟度相对较高，但系统庞大，单位功率较低，在30W/kg左右，且转换效率为20%左右，难以满足航空发动机需求。相比之下，基于布雷顿循环的热电转换技术具有组成部件简单、体积更小、结构更加紧凑、技术成熟度高的特点，转换效率为20% ~ 40%，单位功率

为100 W/kg左右，在中高温热源余热回收利用中性能更优，因此在高超声速飞行器领域具有一定的应用前景。这主要是基于布雷顿循环的热电转换技术：一是弥补了高超声速发动机特别是冲压发动机因无旋转部件无法提取轴功率发电的缺陷，可以实现为高超声速飞行器供电；二是可利用高速条件下气动增压带来的热量作为可持续稳定的热源；三是缓解了飞行器热防护的压力，将热能转向电能的同时，提高了飞行器防隔热的能力。同时，高超声速飞行器大面积蒙皮结构和内部空间、巨大的壁面余热利用潜力也为该技术创造了有力的条件。目前，哈尔滨工业大学针对该技术开展了广泛的研究。

为了实现基于布雷顿循环的热电转换技术在高超声速飞行器上的应用，需明晰涡轮部件的尺寸、发电效率、发电机功率耦合关系，大幅提高该技术的单位功率，重点解决热流获取技术、发电系统与高超声速飞行器一体化设计等问题。

结束语

航空发动机仍旧是当前做功能量密度较高、且可持续提供能量的装置之一，能以紧凑空间、较小质量代价，产生较大能量。因此，从航空发动机多源提取能量进行发电可以满足飞机多电发展需求和未来高能武器能量供给，但无论采取何种能量提取技术，都需要尽量以最小的质量代价获取最大的能量收益，才能在众多的能量提取技术中脱颖而出，从而在航空发动机上广泛应用。

航空动力

(张翠珍，中国航空发动机研究院，工程师，主要从事航空动力新概念、新技术等研究工作)

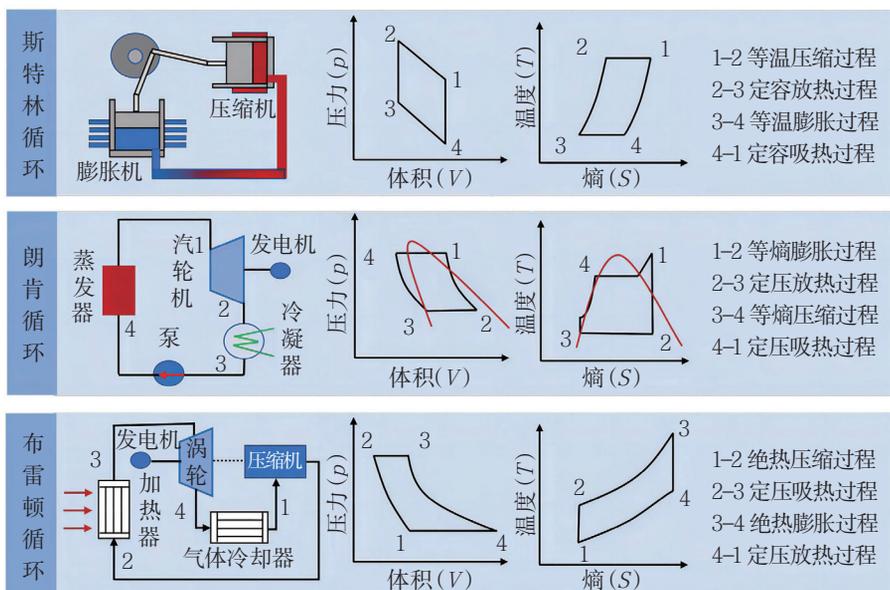


图6 热力循环示意