

脉冲磁流体发电技术研究进展*

唐路^{1,2}, 夏琦¹, 刘保林¹, 彭爱武^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;
2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要: 总结和阐述了现有脉冲磁流体发电机的类型及其国内外研究进展, 同时对磁流体发电过程中的关键技术和科学问题(近电极压降、边界层分离、Hartmann效应、发电系统建模、性能分析、高磁雷诺数、强电磁效应、阻抗匹配等)进行了综述总结, 以期掌握磁流体动力学行为及能量转化机理, 提升发电机性能, 并介绍了在航空航天领域的三种主要应用方式, 磁流体能量旁路、超燃冲压发动机驱动的磁流体发电及表面磁流体发电。最后, 对脉冲磁流体发电技术的发展趋势进行了总结和展望, 旨在对其实用化进程提供指导和借鉴。

关键词: 脉冲磁流体发电机; 高功率电源; 磁流体动力学行为; 发电机性能; 航空航天; 综述

中图分类号: TM 916 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 08-210294-19

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210294

Research Progress of Pulsed MHD Power Generation Technology

TANG Lu^{1,2}, XIA Qi¹, LIU Bao-lin¹, PENG Ai-wu^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper summarizes the types of existing pulsed MHD generators and their research progress at home and abroad. Furthermore, the key technical and scientific issues in the process of MHD power generation (near electrode voltage drop, boundary layer separation, Hartmann effect, power generation system modeling, performance analysis, high magnetic Reynolds number, strong electromagnetic effect, impedance matching, etc.) are reviewed and summarized in order to grasp the MHD dynamic behavior and the mechanism of energy conversion, improve MHD generator performance. Then, three main applications in the aerospace field are introduced, including MHD energy bypass, scramjet-driven air bone MHD power generation, and surface MHD power generation. Finally, the development trend of pulsed MHD technology is summarized and prospected, the aim is to provide guidance and reference significance for its practical process.

Key words: Pulsed magnetohydrodynamic (MHD) generators; High-power source; MHD dynamic behavior; Generator performance; Aerospace; Review

* 收稿日期: 2021-05-13; 修订日期: 2022-01-20。

基金项目: 国家自然科学基金(52076214)。

作者简介: 唐路, 博士生, 研究领域为磁流体发电技术及其应用。

通讯作者: 彭爱武, 博士, 研究员, 研究领域为磁流体能量转换技术及其应用。

引用格式: 唐路, 夏琦, 刘保林, 等. 脉冲磁流体发电技术研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(8):210294. (TANG Lu, XIA Qi, LIU Bao-lin, et al. Research Progress of Pulsed MHD Power Generation Technology[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8):210294.)

1 引言

脉冲磁流体发电机(Pulsed Magneto-hydro-dynamic Generator, PMHDG)是利用法拉第电磁感应原理将磁流体动力学能量转化为脉冲电功率的发电装置^[1-2]。PMHDG的技术优势在于其启动速度快,无机械运动部件,不需要大功率电力电子转换开关及储能部件,可以直接实现电能提取,使得其比重量小,结构紧凑,功率密度及能量密度高,是一种极具潜力的高功率脉冲电源。随着等离子体电离、强磁场技术等相关基础学科的发展,及对特殊高功率电源需求愈加显著,促使国内外研究学者不断探索脉冲磁流体发电技术及其工程化应用。

脉冲磁流体发电技术的研究最早可以追溯到20世纪60年代初,美国MHD研究有限公司开展了爆炸型PMHDG的研制工作,主要应用于军事用途,而同期苏联则主要发展了民用地质探测、地球物理研究的燃烧型PMHDG^[3-4]。20世纪末,俄罗斯研究学者提出AJAX的概念,开启了新一轮磁流体发电技术研究热潮。由于磁流体发电能够直接从高焓气流中提取能量转化为电能,可以扩展超燃冲压发动机马赫数工作范围、实现高功率机载供电及飞行器的气动减阻等,被认为是下一代高超声速飞行器的潜在发展方向^[5-8]。此外,PMHDG在电磁弹射^[9]、电磁轨道炮^[10-11]等领域也具备潜在应用价值。

经历了半个多世纪的发展,脉冲磁流体发电技术的理论不断完善,数值模拟计算速度和精度不断提高,相关实验研究设施及技术手段也不断改进,但仍存在一些关键科学技术问题没有完全解决,特别是磁流体动力学多物理场耦合作用机理和航空航天中应用等问题有待进一步研究。

本文结合国内外在脉冲磁流体发电技术领域开展的研究工作,首先综述了磁流体发电过程中的关键技术和科学问题,然后介绍了在航空航天工程中的主要应用方式,并对其今后发展趋势进行了展望,旨在对深入研究脉冲磁流体发电技术及其实用化进程提供指导和借鉴。

2 脉冲磁流体发电机原理和分类

脉冲磁流体发电机主要由导电流体发生装置、发电通道、磁体系统、电极、负载等部件组成^[12]。PMHDG示意图如图1所示,发电通道为矩形扩张型结构,电极布置在通道内与磁场方向平行的两壁面,其余为电绝缘壁面,基本原理是利用产生的导电流体

作为发电工质,在磁场与导电流体运动正交方向上产生横向电场,将流体的动能转化为负载电能进行提取。

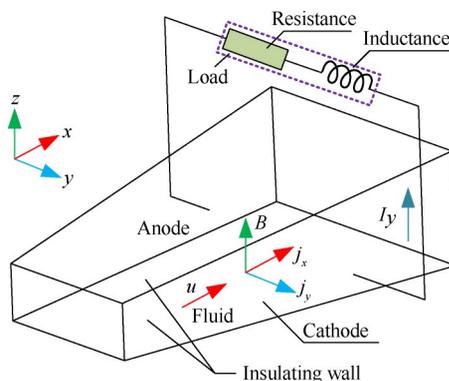


Fig. 1 Schematic illustration of PMHDG

根据导电流体产生方式及基本原理不同,脉冲磁流体发电机可分为燃烧型和爆炸型两种。燃烧型脉冲磁流体发电机使用固体火箭推进剂,加入易电离的碱金属种子,通过燃烧方式产生等离子体。爆炸型脉冲磁流体发电机根据炸药爆炸产生等离子体的技术途径不同,又可分为传统型和新概念爆炸磁流体发电机。传统型爆炸磁流体发电机由美国MHD研究有限公司提出,通过在炸药柱前端添加易电离的铯种子,直接利用炸药爆炸产生的等离子体作为发电工质;新概念爆炸磁流体发电机由美国Artec Associates公司提出,其关键技术在于利用爆炸产生的强激波对发电工质氩气进行激发,使其热焓大幅提高,电离成为高电导率的等离子体^[13]。

表1^[1,4,12,14-16]列出了一些国内外典型脉冲磁流体发电机的性能参数。从表中可以看出,发电通道主要为矩形直线型,部分为圆筒型环状结构。尺寸方面,燃烧型脉冲磁流体发电机(米级)明显比爆炸磁流体发电机(厘米级)要大,前者采用固体粉末等离子体推进剂,电离等离子体的电导率约百S/m量级,速度在2km/s左右,而后者采用了高能炸药单元产生等离子体,其电导率在10000~18500S/m之间,速度可达25.0km/s。由于爆炸磁流体发电机产生的高速、高电导率离子体,可使得发电通道尺寸大幅减小,有效磁体气隙减小,使磁场强度得以提高,发电机功率密度更高。发电性能方面,脉冲磁流体发电机的输出电压为数千伏到数万伏,输出电流为百千安培到兆安培,输出功率在百兆瓦到吉瓦,单位体积内的发电通道功率密度较大,燃烧型脉冲磁流体发电机功率密度为100~150MW/m³,传统型爆炸磁流体发电机功

Table 1 Performance comparison of typical PMHDG

Parameter	Soviet Union ^[14]	Russia Velikhov ^[1]	USA MHD Co., LTD ^[4]	CHINA IEECAS ^[12]	USA Artec Co., LTD ^[15]	USA Sandia Lab. ^[16]
Working fluid	Plasma-forming fuel		Explosive product plasma		Shocked gas plasma slug	
Conductivity/(S/m)	50	110	10000	-	18000	18500
Velocity/(km/s)	2.05	2.19	7.00	2.10	25.00	20.00
Magnetic field/T	2.5	2.0	2.8	2.2	5.6	9.4
Channel structure	Rectangle/expansion	Rectangle/expansion	Rectangle/linear	Rectangle/linear	Cylinder/ring	Rectangle/linear
Power generation channel size/m ($d_{1,2} \times w_{1,2} \times L$)	(0.9~1.6)×1.0×4.5	(0.9~1.4)×(0.5~0.94)×3.7	20×15×78 (×10 ⁻⁶)	1.3×2.0×20.5 (×10 ⁻⁶)	Φ3.8×16.0 (×10 ⁻⁶)	1.27×5.08×119 (×10 ⁻⁶)
Voltage/V	2500	2600	1100	76	1840	10000
Current/A	2.20×10 ⁵	2.20×10 ⁵	2.60×10 ⁵	6.77×10 ³	3.30×10 ⁶	1.80×10 ⁵
Power/W	5.10×10 ⁸	5.70×10 ⁸	2.80×10 ⁸	4.3×10 ⁵	6.07×10 ⁹	1.80×10 ⁹
P_d /(W/m ³)	1.00×10 ⁸	1.50×10 ⁸	1.20×10 ¹⁰	8.00×10 ⁹	3.32×10 ¹³	2.34×10 ¹²
t_{pulse} /s	7.4~8.6	5~10	1.0×10 ⁻⁴	1.19×10 ⁻⁴	3.5×10 ⁻⁵	2.0×10 ⁻⁶
Energy/J	1.9×10 ⁹	2.5×10 ⁹	3.0×10 ⁴	41.7	1.4×10 ⁵	3.0×10 ³
Efficiency/%	12.0	18.0	1.6	1.2	-	0.08

Notes: d : Electrode spacing (The subscripts 1 and 2 indicate the inlet and outlet of the channel); w : Electrode width; Φ : Channel diameter; L : Length; P_d : Power density; t_{pulse} : Pulse width.

率密度为 8.0~12.0GW/m³, 新概念爆炸磁流体发电机功率密度可达 TW/m³, 其劣势也比较明显, 即功率脉宽小(微秒级), 输出电能可达百千焦, 能量利用效率小于 1.6%, 燃烧型脉冲磁流体发电机功率脉宽较大(秒级), 输出电能可达吉焦, 发电效率可达 18%。

因而, 可根据实际高功率脉冲电源的输出功率、脉宽、电能等电气性能参数的不同, 选择并设计合适的 PMHDG, 满足设备正常运行。

3 关键技术研究进展

磁流体发电涉及电磁场、流场及温度场三者的多物理场耦合作用过程, 磁流体动力学行为复杂, 受限于现有的实验条件及测量技术, 仅依靠实验方式难以揭示发电通道内部机理及其强电磁效应等, 需要采用理论分析、数值模拟及实验相结合的手段开展相关研究工作^[17-18]。基于此, 掌握发电通道内部磁流体能量转化机理、发电系统建模及性能分析、高磁雷诺数下强电磁效应对发电机性能的影响, 研究负载特性, 实现对磁流体动力学能量的最大化提取, 研究其它关键技术和科学问题, 不断完善和提高对脉冲磁流体发电技术的研究水平。

3.1 MHD 通道内部机理研究

磁流体发电通道作为导电流体转化为电能输出的重要部件, 分析发电通道内的磁流体动力学行为, 边界层损耗、近电极压降、流动边界层分离、Hartmann 效应、电磁端部效应等, 对磁流体发电过程中的基础

层面问题进行深入研究, 掌握磁流体能量转化机理。

Litchford 等^[19-21]实验研究发现, 较小的通道尺寸及低磁场因素会使得磁流体发电机近电极压降较大, 指出通过改进种子注入方式、施加更高的磁场等方式可以提高发电性能, 考虑边界层损耗效应, 将发电机扩大至实际设备尺寸, 近电极压降将降低至法拉第电压的 10% 以内。

对于近电极压降产生的原因及发电通道内部磁流体动力学行为作用机理, 文献[22-23]分别开展了二维和三维数值模拟分析。Koshiba 等^[22]通过二维数值研究表明, 脉冲磁流体发电机内部近电极压降主要受流动边界层分离效应的影响, 负载电压为 2550V 时, 发电通道内部不会发生流动边界层分离现象, 磁流体动力学特性及电气参数呈对称分布, 阴极电极压降约为 60V, 阳极电极压降约为 120V, 总电极压降约为 180V, 而当负载电压降低为 800V 时, 增强的洛伦磁力会使通道内产生较大边界层分离, 边界层内电极压降加大, 阴极电极压降约为 40V, 阳极电极压降约为 650V, 总电极压降约为 690V, 为不考虑流动边界层分离的 3 倍多。Ishikwa 等^[23]得到了类似的结论, 并指出流动边界层分离是由于发电通道内部激波作用, 低负载电压时, 由于强磁流体效应作用, 霍尔电流及洛伦磁力增大, 会诱发边界层内的斜激波, 一直延伸到发电通道出口, 一方面会使磁流体通道内静温和压力波动, 电导率和霍尔参数变化, 法拉第电流密度下降, 另一方面会在阳极附近产生较大的

边界层分离,发电性能下降,图 2 为磁流体发电通道内马赫数分布。

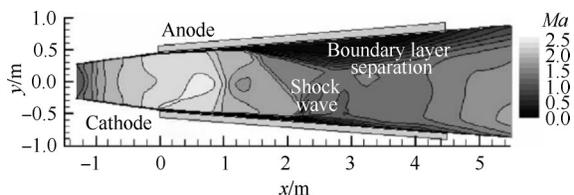


Fig. 2 Distribution of Mach number^[23]

此外,发电通道内 Hartmann 效应、电磁端部效应等也会影响磁流体动力学行为。吕浩宇等^[24]数值研究了高磁雷诺数下通道内部的 Hartmann 效应,研究表明,当忽略电极附近边缘效应对中心流影响,在流量不变的情况下,随着哈特曼数增大,边界层变薄,速度型势必变得平坦,同时感应磁场减小,图 3 为不同哈特曼数时速度型的分布,图中横纵坐标分别为无量纲处理后的速度(u 表示横截面速度, u_0 表示来流平均速度)和 z 向长度。刘艳娇^[25]发现 Hartmann 效应会使得通道内部产生“M”型速度分布,且过渡段受磁场强度梯度变化的影响,还存在电磁端部效应,产生电流涡流和漏电流,进一步加剧流场的不稳定性,内部能量损耗增加。张宇磊等^[26]通过数值研究发现,发电通道的端部效应会使得内部电场畸变,影响输出感应电动势。

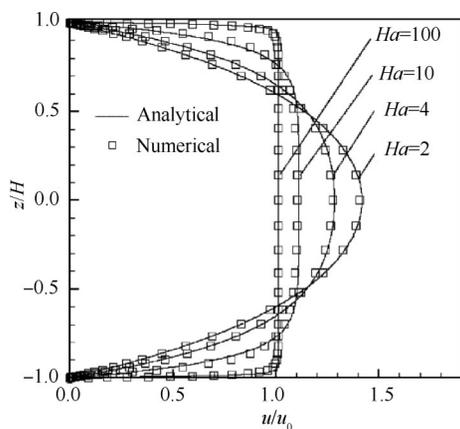


Fig. 3 Distribution of velocity profile under different Ha number^[24]

3.2 发电系统建模及性能分析

脉冲磁流体发电机是一种短时工作获得脉冲电功率的发电装置,尤其是爆炸磁流体发电,又融合了爆炸动力学过程,使得系统建模更加复杂。为了能够对发电性能进行有效评估,除开展磁流体发电实验以外,必须综合相关磁流体动力学、空气动力学、

电磁学等知识,开展发电系统建模及数值研究,分析发电机性能。

Kim 等^[27]建立了爆炸磁流体发电系统的拉格朗日分析模型,高能炸药起爆后,爆轰波沿隔膜方向传播,在磁雷诺数不足以干扰外磁场情况下,驱动气体氩气的压缩速度几乎保持恒定,通过对爆轰室进行合理设计,控制冲击波以平面形状传播,可简化为一维分析。当爆炸室长为 0.2m,激波压缩速度为 9km/s,磁场强度为 0.3T 时,负载与内部等离子体内阻完全匹配,输出峰值功率超过 100MW,脉宽约 15~20 μ s,图 4 为爆炸驱动的线性磁流体发电机概念图。

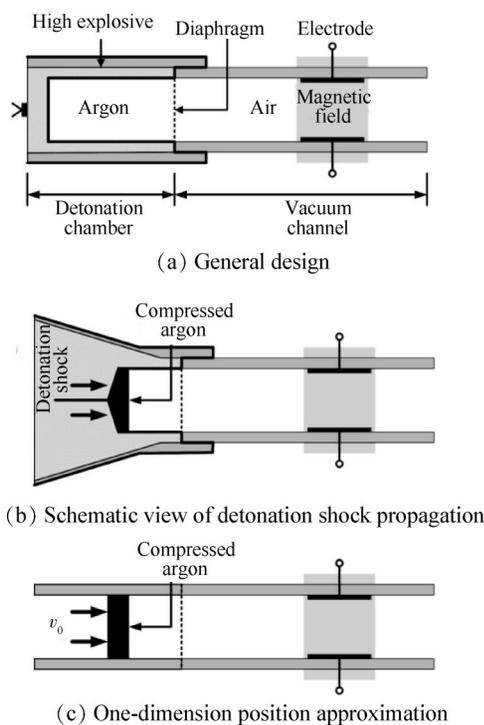


Fig. 4 Conceptual schematic of an explosive driven linear MHD generator^[27]

Ishikawa 等^[14]针对大型脉冲磁流体发电机 (Sakhalin) 建立了一维非定常数学模型,将等离子体视为气液两相混合流,研究了液体颗粒对发电性能的影响。结果表明,如果考虑氧化铝液体颗粒,会使动能和热能从液体颗粒转化到气体中,可以减弱冲击波作用强度,当氧化铝颗粒直径 (5 μ m) 较小时,液体颗粒与气体相互作用变强,表现与单相流近乎相同的行为,而当氧化铝颗粒 (15 μ m) 较大时,输出功率减少约 5%,主要是由于液体颗粒的能量不能直接转换为电能输出。

考虑到脉冲磁流体发电机运行的复杂性,一维分析更适用于工程应用,并不能很好地反映由于强

磁流体相互作用引起的发电通道内部涡流、边界层效应以及霍尔效应引起的电场不均匀分布等,开展三维数值模拟则显得尤为重要。

Hardianto 等^[28]开发了三维数值分析计算方法,采用有限元差分法求解包含电磁、流场相互作用的动量、能量和电场的偏微分方程组,包括N-S方程、Maxwell方程和欧姆定律,以及湍流模型,数值计算的输出功率为510.5MW,与实验数据510MW几乎一致,通道内电流为189kA,与实验数据200kA的计算误差在5.5%以内,验证了发电系统建模及数值计算的可靠性。

3.3 高磁雷诺数下强电磁效应

当发电通道内磁雷诺数接近于1,甚至大于1时,强电磁效应会影响导电流体的磁流体动力学行为,此时电流产生的感应磁场不可忽略,会改变初始磁场分布。研究发现感应磁场作用会使发电通道内磁场畸变,一端加强,另一端减弱,进而影响发电机输出性能^[29-30]。

李希南^[12]考虑到爆炸磁流体发电机处于高磁雷诺数下,对电枢反应进行了定性分析。发电通道内电流产生的感生磁场对外磁场具有强烈的去磁作用,电流增长存在极限,存在最大输出功率,与等离子体的初始速度、宽度和高度有关,与轴向长度和电导率无关,指出在设计和建造大容量爆炸磁流体发电机时,不必过分追求等离子体的电导率,磁雷诺数达到3~4时就足够了。

对于特定的磁流体电通道,需要定量分析大电流产生的电磁效应对磁系统及发电性能的影响,文献^[22, 31-33]分别开展了数值及实验研究。

Koshiba 等^[31]通过一维非稳态两相流数值模拟研究了感应磁场对脉冲磁流体发电机性能的影响。结果表明,由于强电磁效应,磁雷诺数约为0.58,感应磁场作用下,入口和出口处感应磁场强度约为外加磁场的20%和19%,通道上游由于磁场减小,等离子体速度减小,而下游区域磁场增大,速度剧烈减小,会产生强激波,图5为发电通道内磁场强度的分布。并且通过二维非稳态数值模拟开展了进一步研究,采用Harten-Yee逆风TVD方案求解二维气体动力学,Galerkin有限元方法求解电势分布的偏微分方程,数值研究发现,当负载电压为2550V时,感应磁场会使通道入口处总磁场降低约8%,出口处增加约14%,负载电压降低,感应磁场会降低磁流体通道入口附近总磁场,在有和没有感应磁场情况下,输出功率分别为521MW和508MW^[22]。

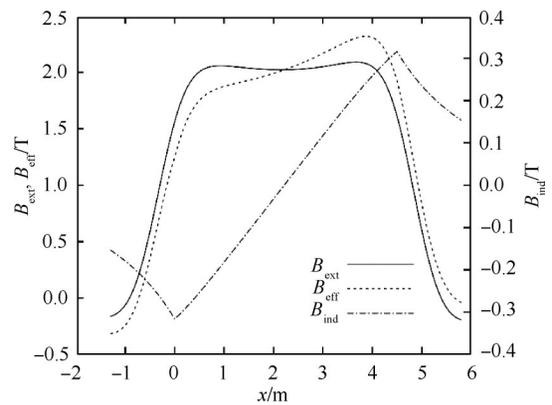


Fig. 5 Distribution of magnetic flux density^[31]

Pain 等^[33]实验研究了爆炸磁流体发电机的强电磁效应,研究表明,当通道内感应电流超过10kA时,磁雷诺数大于1,此时发电通道电流产生感生的磁场,与外磁场叠加后的分布表明,制动压力存在最大值,修正后的洛伦磁力为初始值的0.95倍左右。

发电通道内部强电磁效应加剧了等离子体流场的不稳定性,能否削弱或抑制感应磁场的作用,对提高发电性能具有重要价值。Velikhov 等^[1]针对脉冲磁流体发电机(M-2 MHDG),输出功率为600MW,输出电流为220kA,发电通道内磁雷诺数约为0.5,对磁系统和发电机性能影响在10%~20%以内。通过对电流总线进行走线布置,在发电通道输入和输出之间的四个截面中沿垂直于扁平电极排列布置,正常工作模式下,可有效控制感应磁场,使总磁场与外加磁场分布一致。

3.4 发电机负载特性研究

磁流体发电是一种直接发电方式,输出功率受外负载特性影响。较小负载时会使得通道内部的电流密度变大,洛伦磁力增强,有利于对湍流程度和壁面摩擦损失进行抑制,但发电通道内部导电流体能量损耗会增加,使系统效率降低,较大负载时,虽然可以减少发电通道内部电磁效应造成的功率损耗,但输出电流会随之减小,也会使发电功率减小,故而,必须对负载特性进行研究以提高发电机性能。

Hill 等^[34]通过对自励磁爆炸磁流体发电机展开理论分析,发电通道长1m,励磁电流为10⁵A,初始内阻和电感分别为1mΩ,1μH,等离子体凝块质量为1.5×10⁻²kg,速度为10km/s,磁雷诺数为10时,等离子体动能转化为输出功率效率约为15%,为实现合理转化效率,需在发电机与负载之间进行脉冲功率变换或者阻抗匹配。

Ahn 等^[35]实验探究了负载阻感特性对爆炸磁流

体发电机输出性能的影响。利用充满氩气的环形管作为等离子体发生器,发电通道由直径为 1 英尺的 Lexan 激波管和 4 个法拉第磁流体发电机构成,使用 1.2kg PBX 炸药,磁场强度为 0.4T,负载电阻、电感分别在 2.5~100mΩ,0.15~36μH 变化。实验结果表明,随着负载电阻或电感的增加,电流将呈现指数级下降,对电压影响不大,说明爆炸磁流体发电机内阻呈低阻感特性,负载电感相比电阻对输出电流的影响更加明显。

上述理论及实验研究表明,发电机运行性能受负载阻感特性的影响,为此需要提出有效的解决途径,实现发电通道内部等离子体与负载阻抗匹配,文献[36-37]分别提出了可行的技术方案,并开展了实验研究,以提升发电性能。

Senior 等^[36]研发了一套开关阻抗匹配装置用于自励磁爆炸磁流体发电机的功率调节,可以在成本和效率之间达到最佳平衡。通过对励磁线圈的能量源与负载匹配调节,借助适当的电流源启动磁场,使能量从低功率电源馈入以增加系统磁场,当单个开关损耗足够小时,系统效率随电感减小而减小,随级数增加而增加,通过对线圈宽度、半径、材料或其它参数变化来进行优化设计,实现对输出电流和能量的控制。励磁线圈内外径分别为 30mm 和 100mm,长为 100mm,能量源由 Orinda 电池(21V, 2.4mΩ, 7.6kg)提供,耦合系数为 0.9,电流增益为 2.5 时,系统效率约为 35%,图 6 为爆炸磁流体发电系统工作过程概述。

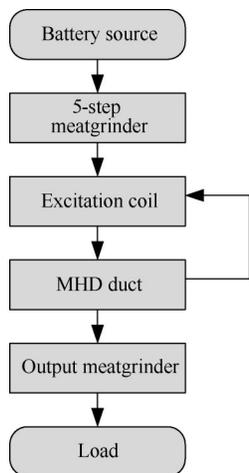


Fig. 6 Overview of work process in an explosive driven MHD power generation system^[36]

英国拉夫堡大学^[37]提出采用恒定节距螺旋线圈替代电极的布置方案,以克服等离子体沿电极运动时,电路中电感的变化,以此来增加感应电压,从而提高爆炸磁流体发电机输出功率,据估算,电感增加 5 倍

可使发电机输出电流从 75kA 增加到 157kA。通过建造一次性爆炸磁流体发电机开展实验研究,采用电容器储能放电提供最大磁场,等离子体速度达 10km/s,发电机输出功率密度为 1TW/m³,持续时间约 10μs。

3.5 其它关键技术及科学问题

脉冲磁流体发电技术的研究内容是非常丰富且富有挑战性的,除上述已经提及的关键技术外,研究学者聚焦于研制可重复输出高速、高电导率的导电流体发生装置,提高发电工质电导率,发电通道结构的优化设计,改变负载联接方式等实现磁流体发电系统高功率输出及高效转换,开展了大量研究工作。

Sha 等^[38]提出了一种枪式液态金属脉冲磁流体发电机设计概念。采用火炮发生装置,使低熔点液态金属弹丸在爆炸后加速升温,进入发电通道时熔化,作为发电工质,由于采用了液态金属作为导电流体,工质电导率更高,且分布均匀好,发电系统结构得以简化。夏琦等^[39]公开了一种以高速液态金属作为发电工质的脉冲磁流体发电机,在外部装置的驱动下,可以提供高电导率(5.7×10⁷S/m)、高速(≈5km/s)液态金属发电工质(紫铜),磁场强度为 1T 条件下,输出功率约为 MW 级,输出脉宽约为 30μs。

Braun 等^[40-41]考虑到旋转爆轰发动机(Rotating detonation engine, RDE)产生的爆轰波温度在 3000~4000K,压力在 0.1~10MPa,且以超过 1kHz 的频率工作,足以使得气体电离,利用 RDE 设施产生高速、高电导率等离子体进行发电,提出了旋转爆轰发动机驱动的磁流体发电机(RDE-MHDG),其技术原理图如图 7 所示。

王心亮^[42]提出了一种新型的爆轰磁流体发电系统,其技术特点是通过脉冲爆轰波产生导电流体,并采用高频强电场作用,获得具有高电导率的高速非平衡态等离子体进行磁流体发电。

张万君等^[43-44]为了给爆炸磁流体发电机提供均匀性好、不易中断的射流发电工质,基于 Ansys/Ls-Dyna 软件建立了半球形聚能装药的有限元分析模型,数值研究了四种不同聚能装药(HMX, Octol, B 炸药, RDX)形成的射流形态,结果表明, RDX 装药形成的射流具有较高的头部速度,且均匀性好,可作为一种新型的聚能装药方案用于优化射流发电工质的均匀形态。并进一步研究了不同装药长径比对射流形成的影响,装药长径比约为 1.2 时射流不容易发生断裂,均匀性最好。

开展磁流体发电实验,要求导电流体必须具备较高的电导率,研究学者开展了提高等离子体电导率的

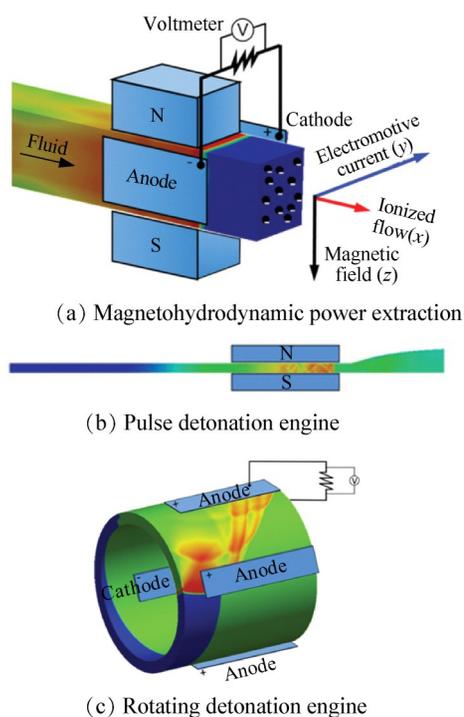


Fig. 7 Technical schematic of RDE-MHDG^[40]

相关研究工作。Velikhov等^[45]研发了带种子钾的等离子体推进剂(SPP Start2)用于为新一代脉冲磁流体发电机提供兆瓦级电能,燃料燃烧生成等离子体速度 $\geq 2.1\text{km/s}$,马赫数约为3,电导率为 550S/m 。周霖等^[46]研究了铝粉对爆轰产物导电性的影响,实验测量了爆轰产物电导率。研究发现,添加金属铝后爆炸产物的电导率会明显提高,炸药TNT和TNT80/Al20生成等离子体的电导率分别为 18000S/m 和 $1.136 \times 10^7\text{S/m}$,主要原因是随着铝粉添加,会使得爆温升高,电子浓度增加,从而导致爆轰产物电导率提高。

发电通道作为脉冲磁流体发电机中能量转换的关键部件,内装有电极、绝缘壁,当导电流体通过有效磁场区域时,由电极向负载输出电能。按照负载联接方式不同,可分为连续电极型、分段法拉第型、斜联型和盘式通道四种,为使负载与发电通道之间联接简单,往往采用连续电极,但是其容易受到霍尔电场影响,使发电性能会变差。Panchenko^[32]对法拉第型磁流体发电机分析表明,采用连续电极,在不发生激波和边界层分离的情况,焓提取率可达15%,采用分段电极,发电性能可以提升20%~30%,但发电系统结构和负载联接方式将变得复杂。此外,发电通道的几何结构(线性、扩张型等)也会影响发电机性能。Cambier^[47]对爆炸过程等离子体流动数值研究发现,等离子体沿爆轰波传播及反向膨胀过程中提取大部分磁流体动力学能量,受扩张通道对等离子体

流加速及膨胀后对气体冷却作用,存在最佳扩张角。Mastsumoto等^[48-49]对扩张型磁流体发电通道数值研究得到了同样的结论,扩张角增大,等离子体平均流速下降,电导率也趋于降低,最佳扩张角为 12.5° 时,发电通道效率最高。

通过上述的介绍和梳理,脉冲磁流体发电技术是融合磁流体动力学、等离子体物理、电磁学、爆炸动力学、材料科学等多学科交叉的研究领域,涉及电磁场、流场、温度场的多场耦合。采用一维非定常分析求解,计算量少,更加适用于工程应用,而二维、三维分析求解N-S方程、Maxwell方程和湍流模型,考虑发电通道内部边界层效应、近电极压降、边界层分离、内部涡流及漏电流等,数值计算精度更高,与实验结果对比验证了分析计算的有效性。此外,脉冲磁流体发电机运行在高磁雷诺数下,抑制强电磁作用产生的感应磁场有利于磁流体能量转换。且需进一步深化对负载阻抗匹配装置、导电流体发生装置、发电通道结构优化及实验研究。近年来,随着等离子体电离、电磁技术等相关应用研究的发展,脉冲磁流体发电技术的应用领域进一步扩展,文献[50-52]介绍了磁流体发电技术应用于高超声飞行器及空间核电转换装置。因此对脉冲磁流体发电技术的理论研究、数值模拟及实验技术不断完善,未来在航空航天领域的应用范围也必将逐渐扩大。

4 航空航天中的应用

20世纪末,俄罗斯Leninets公司提出AJAX的概念,采用磁流体能量旁路(MHD energy bypass)技术用于提高传统超燃冲压发动机性能^[53-54]。此后,许多研究单位及学者围绕脉冲磁流体发电技术在高超声飞行器应用等一系列科学问题开展了大量的研究。主要介绍了磁流体发电技术在航空航天领域的三种主要应用方式,磁流体能量旁路的超燃冲压发动机、超燃冲压发动机驱动的磁流体发电、表面磁流体发电。

4.1 磁流体能量旁路的超燃冲压发动机

随着飞行器飞行范围向高超声速扩展,为满足燃烧室入口马赫数条件限制,来流在进气道内受激波作用不断压缩,气流静温会急剧上升,不断逼近燃烧室材料允许的温度范围,以致允许的加热温升减少,加热量不断降低,导致发动机性能恶化,单位推力下降。磁流体能量旁路技术被认为是超超声速飞行器的潜在发展方向,有望解决燃烧室入口温度高,实现超声速燃烧困难的难题。图8为磁流体能量旁路的超燃冲压发动机系统示意图,主要由进气系统、

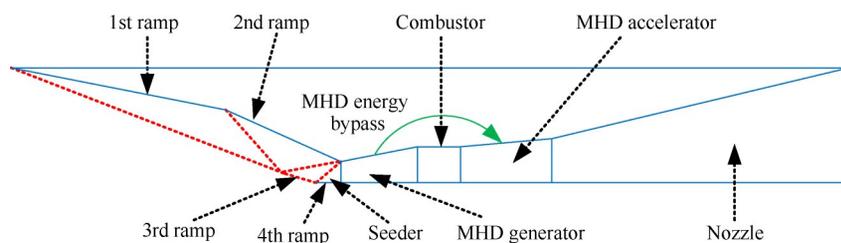


Fig. 8 Schematic of the four-ramp MHD-bypass scramjet system^[55]

种子注入室、MHD发电机、燃烧室、MHD加速器及喷管等组成。通过在进气道与燃烧室间的MHD发电机将来流中能量转化为电能,降低燃烧室入口气流总温,提取的电能可用于机载设备供电,也可通过安装在燃烧室后的MHD加速器使燃气加速,从而提高发动机性能,扩大飞行器的飞行马赫数范围^[55]。

AJAX的关键技术是磁流体能量旁路,研究学者通过数值分析表明,磁流体能量旁路技术可以有效扩大超燃冲压发动机的马赫数工作范围,提高发动机的比冲量。

文献[56-59]从理论及一维数值研究分析了AJAX系统中MHD发电机可以减慢气流的流速,使得燃烧室入口处的马赫数可以维持在特定值以下,实现超声速燃烧,用燃烧室上游产生的电力来提高超燃冲压发动机性能。Park等^[56-57]理论分析表明,与传统超燃冲压发动机相比,磁流体能量旁路技术在飞行速度超过3.5km/s时可以显著提高比冲量,提升传统超燃冲压发动机性能。此外,即使考虑到AJAX系统中流动边界层的湍流效应会降低推力和比冲量,磁流体能量旁路系统也比非MHD系统和典型火箭发动机的比冲量在一定设计参数范围内要好。Kaminaga等^[58]通过准一维数值研究表明,引入磁流体能量旁路,可以在高马赫数条件下获得更高的推力性能,因为MHD发电机抑制了燃烧室入口的滞止温度,可以获得更多的热注入。考虑到进气道阻塞限制等因素,马赫数减少会导致燃烧室热注入减少,建议在低马赫数条件下减小推力。Kuranov等^[59]一维数值计算表明,基于电子束维持的非平衡等离子体MHD发电机,磁流体能量旁路可以控制斜激波产生的位置及捕获来流气体,使进入燃烧室的气流温度和马赫数维持在特定值以内。

考虑到一维、二维数值分析可能会产生计算误差,并不能很好地解释磁流体能量旁路的超燃冲压发动机内部等离子体的流场与电磁场相互作用机理。文献[60-63]采用三维数值模拟求解包含电磁力源项的N-S方程,及描述电场连续性方程的泊松方

程,对磁流体能量旁路过程中出现的近壁面边界层分离、电极附近焦耳热耗散、霍尔效应等电磁现象进行了研究。

Gaitonde^[60-61]数值研究表明,MHD发电机可以有效减缓燃烧室入口气流速度,降低气流总温的同时可以减少超燃冲压发动机入口长度,但是由于复杂的磁流体动力学行为,近壁面会产生分离区域,出现二次涡电流,限制了发电机的有效作用长度。同时,由于粘性力与电磁力的共同作用,近壁面边界层内强电场及体积力较大,焦耳热效应明显,使得MHD加速器的运行效率下降。指出需要进一步开展霍尔效应对发电通道内部的电磁参数分布规律及洛伦磁力所引起侧壁面边界层分离物理现象的研究。

郑小梅等^[62]设计了联合磁控进气道和磁流体能量旁路的磁流体强化超燃冲压发动机。数值计算结果表明,磁流体能量旁路的引入可有效降低燃烧室入口处的马赫数,从而改善发动机性能。磁流体发电机中的流动参数和电参数的分布比较理想,效果显著,而磁流体加速器要取得显著的加速效果则需要大量的能量输入,但是由于电极附近焦耳热耗散严重,会出现局部高温以及流动的复杂性,性能不够理想。图9为磁流体强化超燃冲压发动机外形,图10分别为发动机流道中的电流流线及电势分布。

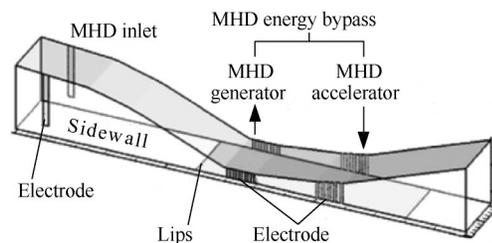


Fig. 9 Geometry of MHD enhanced scramjet^[62]

吕浩宇等^[63]数值研究了霍尔效应对磁流体能量旁路超燃冲压发动机中磁流体发电性能的影响。研究表明,霍尔效应会引起流场和电场的扭曲,诱导出不稳定二次流的发展和演变,破坏了焦耳热的分布,使发电机的焓提取率下降。

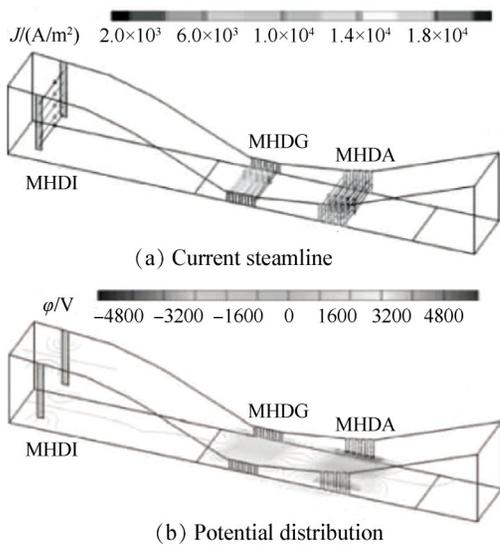


Fig. 10 Electric parameters distributions in the channel^[62]

于达仁等^[64-66]通过分析 AJAX 中能量注入方式的缺点,主要表现为磁流体加速通道中边界层内电流短路现象,近电极壁面电流密度增加,焦耳热明显,发热量较大,温度较高,材料温度受限问题突出。通过改用电弧式能量注入方式,提出了一种新型高超声速推进系统,磁流体电弧冲压发动机(MHD-Arc-Ramjet)联合循环。热力分析结果表明,MHD-Arc-Ramjet联合循环的单位推力与 AJAX 相当,并且可以在更高的温度下实现能量注入,尤其在单位推力方面更具优势。

美国 NASA 格伦研究中心^[67-68]在 AJAX 的研究基础上,提出了一种具有磁流体能量旁路系统的超声速涡轮喷气发动机,如图 11 所示,主要由预电离装置、MHD 发电机、鞍形磁体、MHD 流动控制通道、涡轮发动机、等离子体发生器、MHD 加速器、喷管等组成。Schneider 等^[69]数值研究表明,将磁流体能量旁路应用至 Allison J-102 涡轮发动机中,可以将超声速涡轮发动机马赫数范围扩展至高超声速飞行状态,工作范围从马赫数 3 扩展到 7。当磁流体涡轮组合发动机飞行高度为 30km,进气道马赫数为 7,采用环状霍尔型磁流体发电通道/加速通道,通道长度为 3m,

磁场强度为 5T 时,每单位质量燃料可产生的正推力为 185N/(kg/s),并计划进行风洞实验测试,但并未见后续相关实验进展。

磁流体能量旁路的高超声速冲压发动机,关键技术在于通过磁流体发电从超声速高焓气流中提取能量转化为电能,使进入到发动机的气流马赫数、温度下降,高超声速飞行器可以在高马赫数下工作。虽然,磁流体能量旁路的高超声速发动机有望实现马赫数从亚声速、超声速至高超声速的推进任务,但是在航空航天工程应用中还存在许多实际问题。主要制约因素如下,对于磁流体发电要产生足够强的电磁相互作用,要求进气道气流具备较高的电导率,常采用加入低电位的碱金属种子来提高电导率,该技术方案在脉冲磁流体发电机中得到了成功的应用,但应用于超声速飞行器进气道中通过注入种子铯的方案实现热平衡电离难以达到所需的电导率,且超声速气流与碱金属种子均匀性混合是一个重要的研究课题,目前提出采用预电离装置、电子束电离、高压脉冲直流放电等方式实现非平衡电离以达到磁流体发电所需的电导率仍有待于深入研究。国内外研究单位和学者对此开展了超声速气流磁流体发电实验,为磁流体能量旁路的超声速发动机的进一步研究奠定基础。

美国 JP Aerospace 公司^[70]开展了基于固体火箭发动机的磁流体发电实验研究,采用斜框型发电通道,并配置 14 对法拉第电极及 8 对霍尔电极,永磁体提供磁场,实测的峰值开路电压为 6.20V,图 12(a)为磁流体发电实验。此外,在 31.4km 高空开展了基于火箭发动机驱动的等离子体磁流体功率提取实验研究,如图 12(b)所示。

空军工程大学^[71-77]建成了国内首套基于激波风洞设备产生高超声速等离子体用于磁流体发电实验研究,对开展磁流体发电技术在高超声速飞行器上的应用具有重要研究价值,图 13(a)为激波风洞的磁流体技术实验系统。研究团队对添加 K₂CO₃ 种子、电容耦合射频阻挡放电、高压直流放电产生高温导电

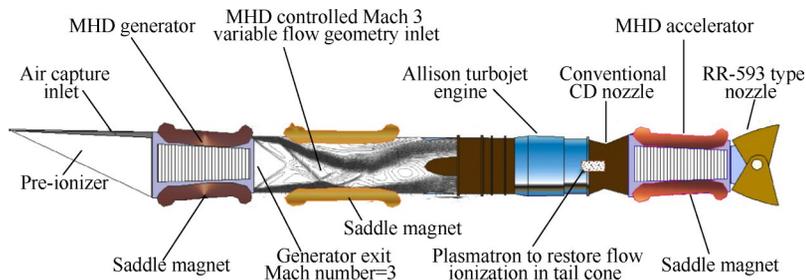


Fig. 11 MHD energy bypass system incorporating jet/gas turbine engines^[68]

等离子体及相关磁流体发电实验进行了深入研究。李应红等^[72]利用激波风洞产生的高超声气流开展磁流体动力学实验研究,矩形截面激波管尺寸为130mm×80mm,高压段长为6m,低压段长为8m,采用双膜机构的破膜方式,气流马赫数为7,通过高压直流放电方式产生高密度等离子体层,在钕铁硼永磁体提供气隙磁场强度为0.4T,可以产生持续时间约10ms的20V脉冲电压输出,图13(b)为等离子体放电图像。李益文等^[73]基于电容耦合射频阻挡放电产生超声速气流,工质气体为氩气,并添加 K_2CO_3 电离种子,当磁流体发电通道入口气流总压为0.32MPa,总温为6504K,入射激波马赫数为4.676,磁场强度为0.5T,负载系数为0.5时,发电通道功率密度最大可达4.8MW/m³,图13(c)为垂直气流和平行气流中的射频放电。

4.2 超燃冲压发动机驱动的磁流体发电

超燃冲压发动机驱动的磁流体发电研究是在美国空军实验室支持下开展的高超声速飞行器电源系

统(Hypersonic vehicle electric power system, HVEPS)五年计划项目中,联合General Atomics公司、Pratt & Whitney公司、Lytec公司、联合技术研究中心(UTRC)、马歇尔航天飞行中心(NASA MSFC)等研究单位评估了磁流体发电技术应用于高超声速飞行器机载供电系统的可行性^[78-80]。图14为超燃冲压发动机驱动的磁流体电概念示意图,利用从大气中吸入的超声速气流作为氧化剂,在超燃冲压发动机中燃烧产生磁流体发电所需的高温气体,并通过添加碱金属种子产生导电等离子体,燃烧室后的废气进入至下游的发电通道进行磁流体功率提取,与其后尾部喷管的推进系统融为一体。

由于发电通道内部存在霍尔电场作用,因此根据负载联接方式不同,可以分为对角导电壁(Diagonal conducting wall, DCW)、对角绝缘壁(Diagonal insulating wall, DIW)、霍尔导电壁(Hall conducting wall, HCW)、霍尔绝缘壁(Hall insulating wall, HIW)及分段法拉第型MHD发电机,其中DCW/DIW及分

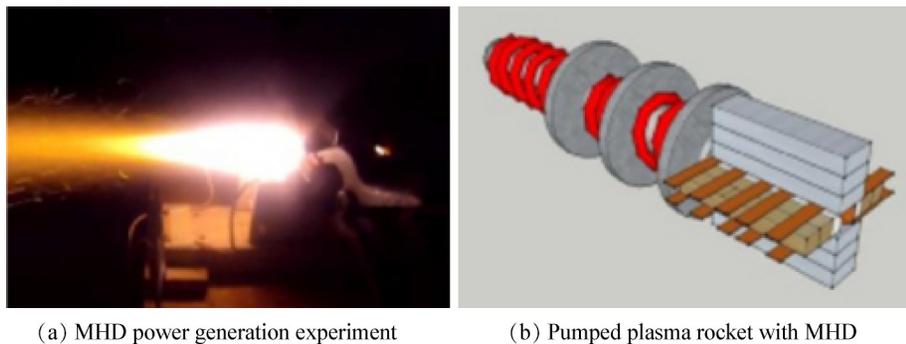


Fig. 12 MHD power generation at JP aerospace^[70]

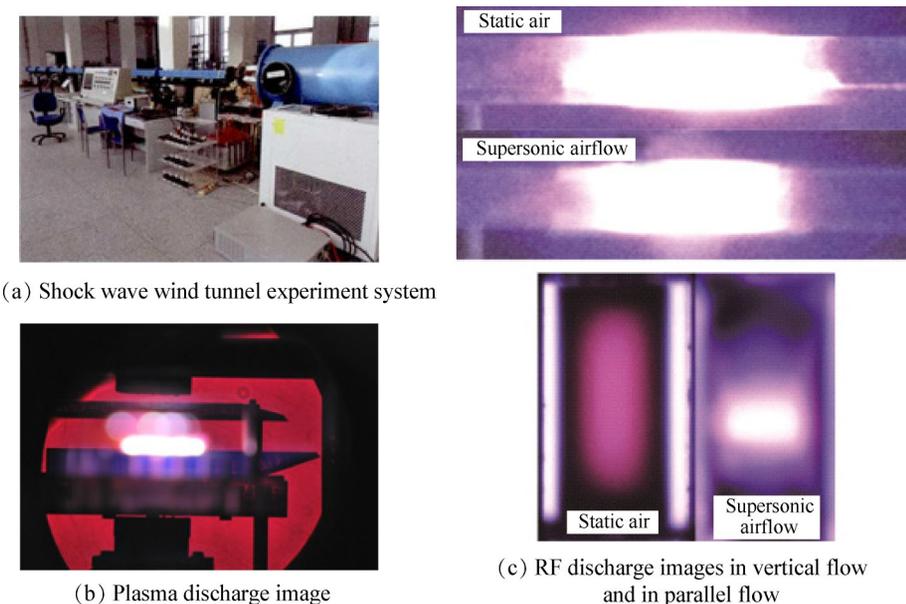


Fig. 13 Hypersonic MHD power generation experiment at air force engineering university^[71-73]

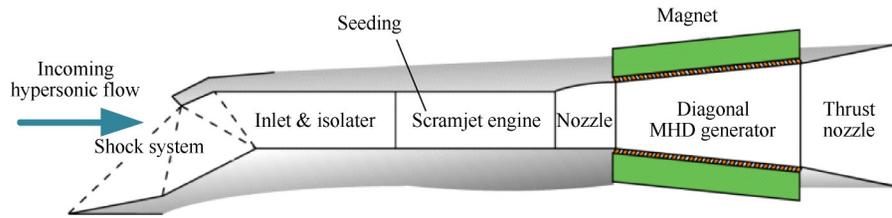


Fig. 14 Scramjet-driven air borne MHD generator concept^[80]

段法拉第型 MHD 发电机主要提取发电通道内法拉第电流用于发电,同时尽可能减少霍尔效应的影响,而 HCW/HIW 型 MHD 适用于发电通道内处于高霍尔参数时,利用霍尔电场进行发电,图 15 为不同磁流体发电机类型对应的解析域和坐标系。

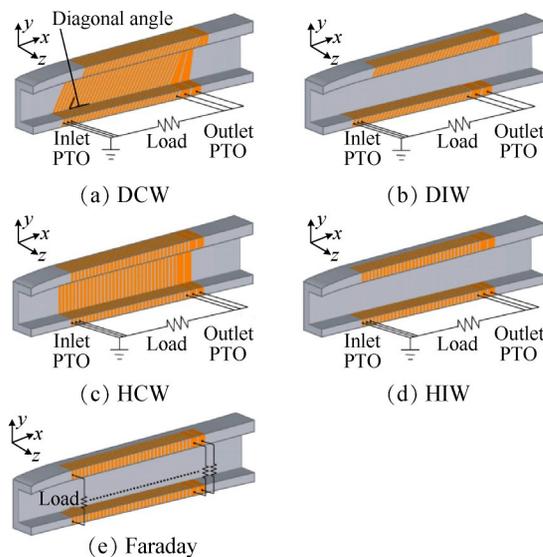


Fig. 15 Analytical domain and coordinate system^[81]

Takahashi 等^[81]数值研究对比了超燃冲压发电机驱动的 DCW, DIW, HCW, HIW 和法拉第型 MHD 发电机的性能。结果表明,DCW 发电机可以获得最大功率输出,与 DIW 和 HIW 发电机相比,DCW 和 HCW 发电机中侧壁上的电极可有效抑制电极压降,而对于所有类型的磁流体发电机,因为发电通道内等离子体平均霍尔参数小于 1,所以霍尔型发电机 HCW 和 HIW 的功率输出低于其他发电机,法拉第型发电机的功率输出与 DCW 发电机提取的功率相当,但是需要为每个电极对配备负载和逆变器,会增加外电路复杂性和成本。Nagakubo 等^[82]也通过数值研究发现 DCW-MHD 发电机能产生最大功率输出,主要是由于发电通道内电流可以从导电侧壁流入电极,研究还表明,法拉第型发电机在最大功率输出的负载条件下发电效率最高。

由于 DCW-MHD 发电机更适用于超燃冲压发动

机驱动的磁流体发电,所以研究学者主要聚焦于 DCW 发电机的电极配置、发电通道入口条件、负载条件、截面形状等对磁流体功率提取进行数值模拟及实验研究。

Takahashi 等^[83]数值分析了超燃冲压发动机驱动的 DCW-MHD 发电机性能,从最大限度提高输出功率,对动力输出区域最佳电极配置进行研究。结果表明,磁流体发电机有效区域和出口动力输出区域与实验结果基本吻合,但在入口动力输出区域与实验结果存在差异,主要是由于入口附近温度不均匀引起的电极压降所导致,且发现当入口和出口动力输出区域最佳电极配置分别为 5 个和 9 个时,发电功率可提高 30%,图 16 为超燃冲压发动机驱动的 DCW-MHD 发电机。此外,进一步研究了两种入口温度条件(入口温度均匀,入口温度不均匀)对等离子体行为和发电性能影响。入口温度不均匀条件下,发电机性能与实验结果大致相符,尽管电压损失比实验结果中观察到的要小,但其在电极附近重建了电压损失的趋势,相比入口温度均匀条件,发电机输出功率减小 40%,因为考虑入口温度不均匀性,焦耳耗散与洛伦兹力做功之比会随着有效磁流体发电区域的减少而增加^[84]。

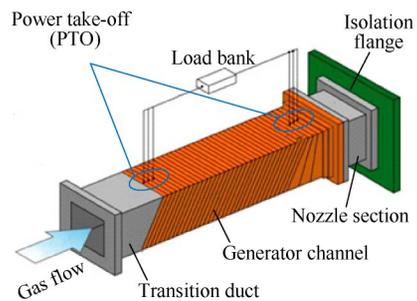


Fig. 16 Experimental scramjet driven DCW-MHD generator^[83]

Hardianto 等^[85]通过分析 DCW-MHD 发电通道内流速、电流密度分布及输出功率,研究发现燃烧室燃烧效率越高磁流体发电性能越好,燃烧效率为 95% 时获得最佳性能。

Niwa 等^[86]探讨了在不同负载条件下对不同截面形状的 DCW-MHD 发电机性能的影响。结果表明,最佳负载时,圆形和方形截面发电机的输出功率均超过 10MW,两种发电机的发电性能几乎相等。此外,开路 and 短路条件下,洛伦兹力将推动导电流体向上壁或下壁面运动,导致相对壁上边界层的生长,受洛伦兹力推动的流体沿侧壁流动,特别是发电机开路时,边界层内会产生涡流状二次流,其外观也因截面形状而不同。

Niwa 等^[87]进一步对超燃冲压发动机驱动的 DCW-MHD 发电机性能受截面形状影响的内部作用机理进行了研究。最佳负载条件下,非对称方形截面的输出功率达到 26.6kW,对称方形截面为 24.6kW,圆形截面为 22.4kW,具有不对称方形横截面发电机获得了最高输出功率。研究认为引起功率输出差异的内部机理在于由流速和边界层厚度的差异引起,对于非对称方形截面的发电机,平均流速最高,边界层最薄,流速和边界层厚度的差异是由压缩波的叠加引起的,而压缩波的产生取决于通道形状。

Inoue 等^[88]提出了一种带改进动力输出 (Power take-off, PTO) 电极的 DCW-MHD 发电机,新 DCW-MHD 发电机(带过渡电极)第 1~8 个入口 PTO 电极的角度从 90°变为 45°,第 37~44 个出口 PTO 电极的角度从 45°变为 90°,电极角度变化间隔为 5°,旧 DCW-MHD 发电机(无过渡电极)电极配置的对角线角度均为 45°。数值研究表明,带过渡电极的 DCW-MHD 发电机可以实现更高的输出功率,达到 11.7MW,而无过渡电极的 DCW-MHD 发电机的输出功率为

10.1MW。主要是由于带过渡电极的 DCW-MHD 发电机在第一个和最后一个 PTO 电极上电流密度降低,使入口和出口区域感应涡流消失,提高发电性能,图 17 为 $x-y$ 平面上的电流密度和电流流线分布。

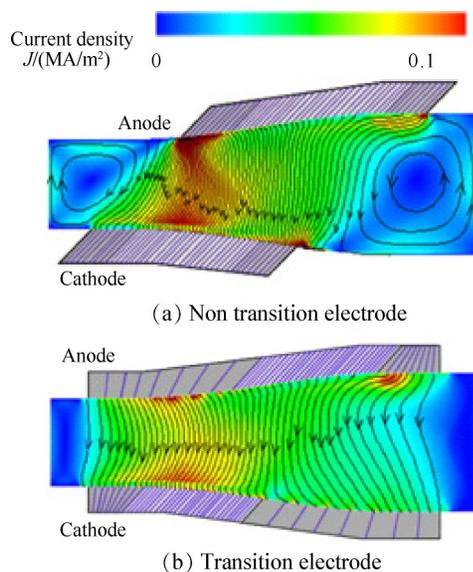


Fig. 17 Distributions of the current density and the current streamline on the $x-y$ plane^[88]

超燃冲压发动机驱动的磁流体功率提取实验研究主要是在 HVEPS 研究计划中完成^[78-80, 89]。其中 UTRC 负责超燃冲压发动机燃烧室试验平台 (Test Cell 5) 测试,模拟高超声速飞行器飞行条件(马赫数为 4.0~8.0,飞行高度大于 30km),燃烧室燃烧效率在 70.0%~95.0%,具体取决于试验条件,图 18(a)为超燃冲压发动机实验测试平台。Lytec 公司开展 MHD 发电机研制工作,采用对角导电壁(DCW)的配置,发电



(a) UTRC test Cell 5 scramjet test article



(b) Assembled MHD generator channel



(c) Assembled scramjet MHD test bed

Fig. 18 Scramjet-driven MHD power generation experiment in HVEPS project^[89]

通道内布置有33对电极,对角线角度为 60° ,电极间距为1.80cm,发电通道长为59.28cm,前五个和最后五个电极作为PTO系统用于将功率提取至负载,图18(b)为组装的磁流体发电通道。General Atomics公司和NASA设计了配套使用的超导磁体,采用分体式线圈设计,线圈供电90A时,可产生3.0T的峰值磁场,考虑到容纳HVEPS磁流体发电通道的结构尺寸,可以为之提供峰值磁感应强度约为2.2T,图18(c)为组装超燃冲压发动机磁流体发电试验平台。实验采用预热氢气作为燃料,空气和氧气作为氧化剂,电离种子为NaK,发电通道进口总压和总温分别为0.2374MPa和2985K。当磁场强度为1.48T,燃烧效率为89.0%,负载电阻为 1.95Ω 时,输出峰值功率为14.8kW;当磁场强度为1.80T,燃烧效率为77.0%,负载电阻为 7.25Ω 时,输出峰值功率为8.48kW。实验测试的电力输出符合预期的目标范围。此外,指出磁流体电源在进一步实验中需要关注三个重要影响因素,电离份数、壁面摩擦损失、近电极压降,因为将其将强烈影响磁流体动力学行为和等离子体的电导率,进而影响发电性能。

4.3 表面磁流体发电

飞行器以5~8km/s的速度再入大气层时,弓形激波层的温度超过2500K,激波层中的空气被电离,注入一定量的碱金属种子蒸汽,通过热电离可以使驻点附近的电导率维持在较高水平,电离的气体与磁场相互作用,可用于MHD功率提取,通过机载磁场装置和表面电极,从具有导电性的弱电离气体绕流中实现电能提取。因此,基于表面磁流体发电装置提取的电能可用于再入飞行器能量供应或实现飞行器减阻和增升^[90-92]。

针对表面磁流体发电机数值计算方面,文献[93-95]利用低磁雷诺数近似的磁流体动力学模型对流场与电磁场进行数值模拟,以高斯函数模拟近壁面气体电导率分布,采用有限元差分法耦合求解N-S方程及Poisson方程。文献[96-100]基于热化学平衡电离模型,考虑了霍尔效应及等离子体滑移效应,对流项通过水平对流迎风分裂格式(Advection upstream splitting method, AUSM)计算,粘性项使用二阶中心差分方案计算,时间积分项通过上下三角矩阵对称高斯赛德尔(Lower upper symmetric Gauss-Seidel, LU-SGS)隐式方案,指定数值计算边界条件进行迭代求解,开发了具有磁流体效应和功率提取的非平衡高超声速流动耦合计算方法。

尽管不同学者研究的表面磁流体发电装置的物

理模型、数值条件、计算方法不同,但数值研究内容包括飞行器的形状结构、再入飞行条件、电极配置等对磁流体功率提取,减少壁面热通量和高空飞行器减阻。

陈刚等^[95]提出了钝锥再入飞行器上表面磁流体发电装置方案(图19),在典型再入条件(飞行高度46km,速度为7km/s)下,施加外部磁场强度为0.2T,种子质量份数为1wt%,磁流体发电装置可实现兆瓦级(1.28MW)功率输出,发电效率为29.4%。此外,研究发现在发电区域末端,存在“电流泄漏”的现象,与电极间的“动电电流”形成涡电流,使发电性能下降,指出可以通过适当延长电磁线圈长度,控制种子的喷射条件,在一定程度上抑制“电流泄漏”。

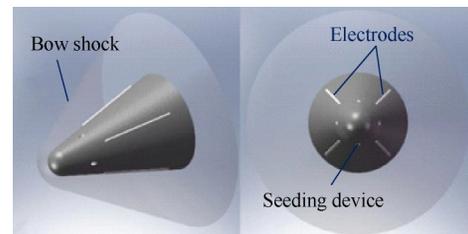


Fig. 19 Scenario of external MHD generator^[95]

Miles等^[97]对再入飞行器周围的高温气流中提取磁流体能量数值研究表明,当飞行器外形为圆锥形,半锥角度为 12° ,头部半径为10cm,飞行高度为45~60km,速度为6~7km/s时,外部磁场强度为0.2T,可以在飞行器3~5cm厚表面每平方米的边界层中提取百千万至兆瓦级的功率输出,但必须添加1%wt左右的碱金属蒸汽,如果不添加电离种子,功率会下降五倍甚至更多。此外,研究还表明可以将提取的电能用于减阻和增强升力,将从边界层提取的800kW功率用于飞行器头部的流动控制中,在迎风侧和背风侧压力有明显减小,在尚未优化能量添加位置时,阻力减小了15%,阻力功率降低了32MW,升阻比增加,即消耗800kW功率可以获得32MW的推力,且由于增加的热量使气体导电性增强,发电性能提高了两倍,通过优化等离子体的位置还可以进一步增强升力,图20为再入飞行器进行磁流体功率提取示意图。

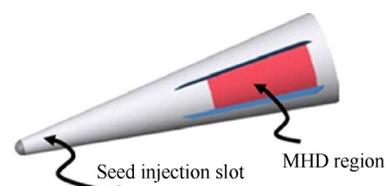


Fig. 20 Diagram of a re-entry vehicle with the MHD power extraction section between “fin” electrodes^[97]

Fujino 等^[98]提出了再入飞行器机载表面霍尔型磁流体发电进行电能提取,研究表明,当飞行高度和速度分布约为 60km, 5.6km/s, 外加磁场强度在 0.3~0.5T 内变化,可提取超过 1MW 的功率,通过调整负载电压和外加磁场大小,可以在很宽的范围内(几百千瓦至几兆瓦)控制输出功率,图 21 为再入飞行中进行

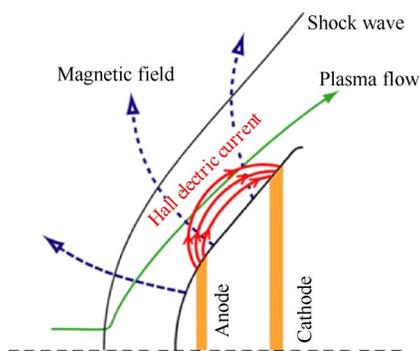


Fig. 21 Concept of on-board surface Hall type MHD power generator for extracting electric power in re-entry flight^[98]

机载表面霍尔型磁流体发电功率提取的概念图^[93]。

由于发电性能强烈依赖于再入飞行条件,主要是因为其会影响等离子的电气参数(电导率和霍尔参数),因此需进一步研究电极配置及再入飞行条件对发电机性能的影响。

Fujino 等^[99-100]研究了当阴极电极位置和形状固定时,不同阳极配置(形状和位置)对机载表面磁流体发电机性能的影响。飞行器头部半径为 1.35m,在锥体表面布置一对电极,环形阳极位于驻点附近,环形阴极位于肩部附近。当飞行高度和速度分别为 60km 和 5.6km/s,外加偶极磁场最大值为 0.5T 时,研究表明,机载表面霍尔型 MHD 发电机可有效缓解驻点处的壁面热通量,输出功率超过 1MW。当环形阳极远离驻点时,一方面环形阳极与阴极之间的距离变短,使发电量变小,提取功率变小,另一方面由于在驻点附近更宽的区域内可以获得强 MHD 相互作用的强霍尔电场,可以减少停滞点处的壁面热通量。

Takayama 等^[101]对不同飞行高度条件机载表面霍尔型 MHD 发电机性能及空气动力学特性展开数值研究,再入飞行器头部半径为 1.35m,飞行高度为 52~64km,驻点处施加偶极磁场强度为 0.5T。结果表明,随着飞行高度的增加,在激波层中产生了具有更高电导率及霍尔参数的等离子体,输出功率变大。在 64km 飞行高度,可提取功率为 5.5MW,负载电流为 2.5kA,而在 52km 飞行高度下,由于不能在激波层中产生足够高电导率以引起强烈 MHD 相互作用的等离

子体,提取的功率仅为 15kW。此外,同样证实了运行的 MHD 发电机可以减少驻点处的壁面热通量,且通过调整阳极和阴极之间的负载电压,具备高空阻力控制的可能性,图 22 为不同飞行条件下的负载电压与电流之间的关系。

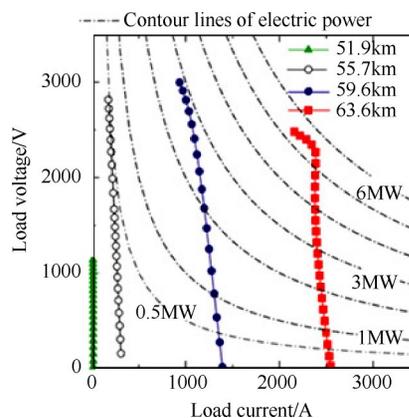


Fig. 22 Relationship between load voltage and load current at each flight altitude^[101]

一些研究机构及学者开展了高超声速气流中钝锥周围的 MHD 相互作用及表面磁流体发电实验研究,并取得了一些有益的结果。

Cristofolini 等^[102]实验研究了高超声速氩气气流中锥形测试体周围的 MHD 相互作用,通过高熔电弧加热高超声风洞提供马赫数为 6 的氩气气流,分析了锥形测试体激波层中的磁流体作用。实验表明,在有和没有 MHD 相互作用下,锥体周围的流场发生了明显变化,MHD 相互作用下法拉第电流产生较大的焦耳热效应,强磁场作用区域,出现了明显的等离子体环,反向洛伦兹力增大,相比没有 MHD 相互作用时,激波层的厚度和冲击压力提高了约 7%~13%。此外,实测的霍尔电场平均值在 400~500V/m,波动范围在 40% 以内,图 23 为有无 MHD 相互作用时锥形测试体的实验照片。

俄罗斯高温科学研究所 Bityurin 等^[103-104]进行了表面磁流体发电的实验研究,由高频等离子体驱动的风洞设施提供超声速飞行器的典型焓值,实验气

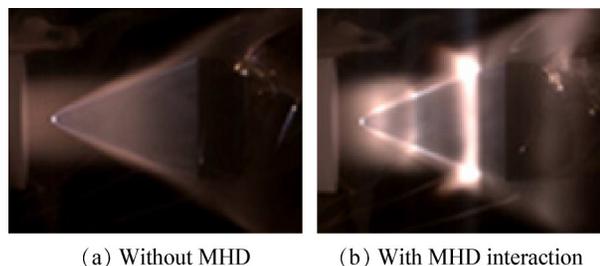


Fig. 23 Experimental photographs of large test body^[102]

流马赫数为12,脉冲磁场强度为2T,每平方米电极可实现20kW的电力输出,认为在磁流体发电中存在的近电极现象及霍尔效应对发电性能具有很大影响,是下一步研究需要关注的问题,图24分别为电极板、磁系统线圈、系统组装图及实验照片。

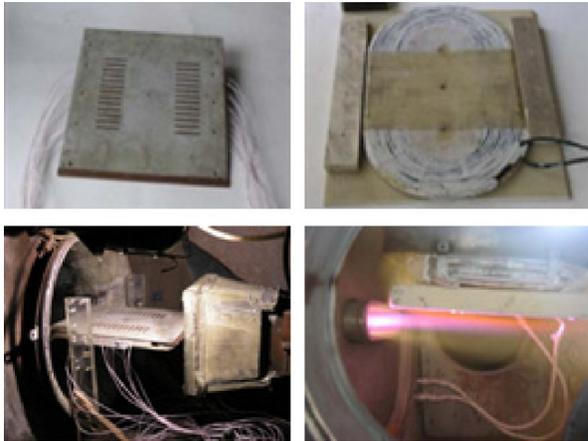


Fig. 24 On-board electrical power generation at institute of high temperature of Russian academy of sciences^[104]

经过国内外研究学者的共同努力,脉冲磁流体发电技术应用于磁流体能量旁路、超燃冲压发动机及表面磁流体发电的作用机理已经基本清晰,并证实了其在扩展飞行器的工作马赫数范围、机载高功率供电、减阻和增升方面具有优越性能,相关理论分析及数值模拟技术已经趋于完善,但实验技术发展仍处于实验室研究阶段,距离在航空航天领域的工程化应用仍待进一步发展。李益文等^[66]也指出磁流体技术在航空工程中的应用需要揭示磁流体流动的多场作用机理,开展基础实验研究,再转向为工程应用研究。因此,需要不断加深对脉冲磁流体发电中关键技术和科学问题的研究,推动高超声速磁流体发电系统实验技术发展,深化在航空航天领域的应用。

5 结论与展望

本文对脉冲磁流体发电技术的研究进展、关键技术及科学问题、在航空航天领域的三种主要应用方式进行了综述和分析,结论与展望如下:

(1)多场耦合作用机理研究。磁流体发电涉及电磁场、流场、温度场三者之间的多物理场耦合作用,磁流体动力学行为复杂,开展多场耦合建模分析及三维数值模拟计算,完备磁流体动力学偏微分方程组包含电磁力源项的N-S方程,研究强MHD相互作用下的磁流体流动现象及等离子体电离特性,揭

示发电通道内部能量转化机理,分析近电极压降、流动边界层分离、电磁端部效应、霍尔效应、电极结构配置等对发电性能的影响,为脉冲磁流体发电机优化设计提供理论分析及仿真数据支撑。此外,结合必要的实验研究以更好地分析磁流体流动特性及其作用机理。

(2)航空航天领域的应用研究。磁流体能量旁路技术能够有效降低超燃冲压发动机的入口总温,使气流马赫数控制在特定值以内,扩展高超声速飞行器马赫数工作范围,提高推力性能。以超燃冲压发动机驱动的磁流体发电可以解决传统发动机由于没有旋转部件,无法采用传统方式进行放电的弊端,从高焓气流中直接提取电能实现飞行器高功率、长时间的机载供电。此外,表面磁流体发电技术可以为飞行器再入时提取电能,除为机载设施供电,还可以用于飞行器减阻及增升。脉冲磁流体发电技术在航空航天工程具有广阔的应用价值,相关的理论及数值研究结果已经证实了其在高超声速飞行的独特优势,然而相关的实验研究尚不能达到工程化实用阶段,制约其在高超声速飞行器应用的一些关键技术包括:超声速气流电离技术、气流与种子均匀混合、高电导率、体积重量等。为此,研制磁流体技术实验系统,采用激波风洞等技术手段提供超声速马赫数的气流测试条件,开展基础实验研究,不断积累实验经验及创新性研究成果,以更好地转向工程应用研究。

(3)推动多科学发展及航空航天技术进步。脉冲磁流体发电技术的研究并不是独立地进行,其研究深入必将会带动磁流体动力学、空气动力学、电磁学、等离子体物理、磁体技术、高温技术、材料科学等相关的学科发展,促进航空航天技术的发展进步。

因而,无论从技术前景还是应用价值,脉冲磁流体发电技术及其在航空航天中的工程化应用值得进行深入研究和探索。

致谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] Velikhov E P, Afonin A G, Butov V G, et al. A New Generation Pulsed MHD Generator [J]. *Doklady Physics*, 2019, 64(5): 238-243.
- [2] 居滋象, 吕友昌, 荆伯弘. 开环磁流体发电[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1998.
- [3] 孙玉武, 倪秋芽, 童建忠. 脉冲磁流体发电机研究的发展状况[J]. *高技术通讯*, 2000, 10(6): 102-106.
- [4] Jones M S, Blackman V H. Parametric Studies of Explo-

- sive-Driven MHD Power Generators[C]. Paris: International Symposium on Magnetohydrodynamic Electric Power Generation Conference, 1964.
- [5] 郑小梅, 吕浩宇, 徐大军, 等. 二维超燃冲压发动机磁控进气道的数值模拟[J]. 推进技术, 2010, 31(1): 12-17. (ZHENG Xiao-mei, LU Hao-yu, XU Da-jun, et al. Numerical Simulation of a Two-Dimension Scramjet MHD Controlled Inlet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(1): 12-17.)
- [6] 陈瑞锋, 魏志军, 王宁飞. 磁流体能量旁路超燃冲压发动机的混合和燃烧性能数值研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 999-1004.
- [7] 张义宁, 刘振德. 磁流体-斜爆震冲压发动机概念研究[J]. 推进技术, 2013, 34(1): 140-144. (ZHANG Yi-ning, LIU Zhen-de. Conceptual Research on Magnetohydrodynamics-Oblique Detonation Ramjet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(1): 140-144.)
- [8] 黄浩, 黄护林, 张喜东, 等. 基于电子束电离的高超声速磁流体发电机[J]. 推进技术, 2013, 34(5): 706-712. (HUANG Hao, HUANG Hu-lin, ZHANG Xi-dong, et al. Hypersonic Magnetohydrodynamic Generator Based on Electron-Beam-Generated Ionization[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(5): 706-712.)
- [9] 杨文将, 刘宇, 于有志. 航天磁悬浮发射脉冲磁流体供能系统方案分析[J]. 宇航学报, 2005, 26(6): 828-832.
- [10] Afonin A G, Butov V G, Sinyaev S V, et al. Rail Electromagnetic Launchers Powered by Pulsed MHD Generators[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(7): 1208-1212.
- [11] Afonin A G, Butov V G, Panchenko V P, et al. Multirail Electromagnetic Launcher Powered from a Pulsed Magnetohydrodynamic Generator[J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2015, 56(5): 813-822.
- [12] 李希南. 小型爆炸磁流体发电机实验装置研制[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2006.
- [13] 李希南, 严陆光. 爆炸磁流体发电机研究进展及其关键问题[J]. 华北电力技术, 2005, 1(5): 13-17.
- [14] Ishikawa M, Koshiba Y, Matsushita T. Effects of Induced Magnetic Field on Large Scale Pulsed MHD Generator with Two Phase Flow[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(5): 707-724.
- [15] Baum D W, Gill S P, Shimmin W L, et al. High-Power Pulsed Plasma MHD Experiments[R]. California: Artec Associates Inc, 1982.
- [16] Agee F J, Lehr F M, Vigil M, et al. Explosively-Driven Magnetohydrodynamic(MHD) Generator Studies[C]. Albuquerque: 10th IEEE International Pulsed Power Conference, 1995.
- [17] 黄护林, 李林永, 李来, 等. 等离子体磁流体发电研究进展[J]. 深空探测学报, 2018, 5(4): 331-346.
- [18] 李益文, 张百灵, 李应红, 等. 磁流体动力学在航空工程中的应用与展望[J]. 力学进展, 2017, 47(1): 452-502.
- [19] Litchford R J, Thompson B R, Lineberry J T. Towards Integrated Pulse Detonation Propulsion and MHD Power[R]. AIAA 99-3662.
- [20] Litchford R J, Thompson B R, Lineberry J T. Pulse Detonation Magnetohydrodynamic Power[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16(2): 251-262.
- [21] Litchford R J, Jones J E, Dobson C C, et al. Pulse Detonation Rocket MHD Power Experiment[R]. AIAA 2002-2231.
- [22] Koshiba Y, Yuhara M, Ishikawa M. Two-Dimensional Analysis of Effects of Induced Magnetic Field on Generator Performance of a Large-Scale Pulsed MHD Generator[R]. AIAA 2004-2368.
- [23] Ishikawa M, Yuhara M, Fujino T. Three-Dimensional Computation of Magnetohydrodynamics in a Weakly Ionized Plasma with Strong MHD Interaction[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 181(1): 254-259.
- [24] 吕浩宇, 李椿萱. 三维非理想高磁雷诺数磁流体流动的数值模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(5): 496-502.
- [25] 刘艳娇. 点吸收式液态金属磁流体波浪能发电系统性能特性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [26] 张宇磊, 王勇, 谢玉东, 等. 新型液态金属磁流体发电动力学特性数值模拟[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(1): 101-106.
- [27] Kim D K, Seo M S, Kim I. Lagrangian Simulation of Explosively Driven Magnetohydrodynamic Generator[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(11): 8884-8889.
- [28] Hardianto T, Sakamoto N, Harada N. Three-Dimensional Flow Analysis in a Faraday-Type MHD Generator[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, 44(4): 1116-1123.
- [29] Kobayashi H, Shionoya H, Okuno Y. Influence of Non-Uniform Magnetic Flux Density on Turbulent MHD Flows in a Liquid Metal MHD Power Generator[R]. AIAA 2011-3602.
- [30] Satake S, Maeda T, Shimzu K, et al. Study of Influence of Induced Magnetic Field of Liquid Metal MHD Generator Experimental Facility[R]. AIAA 2007-4022.
- [31] Koshiba Y, Matsushita T, Ishikawa M. Influence of Induced Magnetic Field on Large-Scale Pulsed MHD Generator[R]. AIAA 2002-2145.
- [32] Panchenko V P. Preliminary Analysis of the "Sakhalin"

- World Largest Pulsed MHD Generator[R]. *AIAA* 2002-2147.
- [33] Pain H J, Smy P R. Experiments on Power Generation from a Moving Plasma[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1961, 10(1): 51-64.
- [34] Hill W G, Page R H. Self-Excited Explosive-Driven MHD Generator[J]. *AIAA Journal*, 2012, 50(5): 942-944.
- [35] Ahn J W, Choi J S, Lee J, et al. The Effects of Resistance and Inductance of an External Load on the Performance of Explosively Driven MHD generators [C]. *Norfolk: International Power Modulator Symposium*, 2000.
- [36] Senior P, Stewardson H R, Smith I R, et al. A Compact Self-Excited Pulsed MHD Generator with Novel Power Conditioning [C]. *Albuquerque: IEEE International Pulsed Power Conference*, 1993.
- [37] Senior P, Smith I R, Stewardson H R. Pulsed Magnetohydrodynamic Generators [C]. *London: IEE Colloquium on Pulsed Power*, 1996.
- [38] Sha Ci-wen, Zhao Lin-zhi, Peng Ai-wu. Gun-Type Liquid Metal MHD Pulse Generator Concept and Analysis [R]. *AIAA* 2011-3289.
- [39] 夏琦, 赵凌志, 李建, 等. 一种以高速液态金属为发电工质的脉冲磁流体发电机 [P]. 中国: CN106685180A, 2017-05-17.
- [40] Braun J, Saracoglu B H, Magin T E, et al. One Dimensional Analysis of the Magnetohydrodynamic Effect in Rotating Detonation Combustors [J]. *AIAA Journal*, 2016, 54(12): 1-7.
- [41] Braun J, Saracoglu B H, Magin T E, et al. Mono Dimensional Analysis of the Magnetohydrodynamic Effect in Rotating Detonation Combustors [R]. *AIAA* 2016-0898.
- [42] 王心亮. 爆轰磁流体发电概念及核心问题研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2009.
- [43] 张万君, 李国辉, 王凯琳, 等. 装药长径比对半球形聚能装药射流成型的数值模拟 [J]. *火炸药学报*, 2017, 40(5): 98-101.
- [44] 张万君, 李国辉, 王凯琳, 等. 半球形不同聚能装药对射流发电工质影响的数值模拟研究 [J]. *信息通信*, 2017, 9(9): 19-21.
- [45] Velikhov E P, Dogadaev R V, Panchenko V P, et al. Study of Properties of Combustion Products of Advanced Solid Plasma-Generating Propellant for Pulsed MHD Generators [J]. *Doklady Physics*, 2010, 55(7): 338-343.
- [46] 周霖, 廖英强, 徐更光. 爆轰产物导电性的实验测量 [J]. *含能材料*, 2005, 13(3): 148-149.
- [47] Cambier J L. MHD Power Extraction from a Pulse Detonation Engine [C]. *Cleveland: AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1998.
- [48] Matsumoto M, Murakami T, Okuno Y. Numerical Studies of Flow Behavior and Performance in a Pulse-Detonation-Driven MHD Generator [R]. *AIAA* 2007-4130.
- [49] Matsumoto M, Murakami T, Okuno Y. Numerical Simulation on the Performance of a Pulse Detonation Driven MHD Power Generator [J]. *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2008, 56(648): 34-40.
- [50] Jiang H, Liu J, Luo S C, et al. Hypersonic Flow Control of Shock Wave/Turbulent Boundary Layer Interaction Using Magnetohydrodynamic Plasma Actuators [J]. *Journal of Zhejiang University Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2020, 21(9): 745-760.
- [51] Korotaeva T A, Fomichev V P, Yadrenkin M A. Numerical and Experimental Simulation of Magnetohydrodynamic Interaction in a Hypersonic Flow of a Blunt Body [J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2020, 61(2): 162-170.
- [52] 刘飞标, 朱安文. 月球基地闭环核能磁流体发电技术初步研究 [J]. *载人航天*, 2017, 23(2): 202-206.
- [53] Gurijanov E, Harsha P. AJAX: New Directions in Hypersonic Technology [R]. *AIAA* 96-4609.
- [54] 郑小梅, 徐大军, 蔡国飙. MHD能量旁路超燃冲压发动机可行性分析 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(3): 272-275.
- [55] Fraishtadt V L, Kuranov A L, Sheikin E G. Use of MHD Systems in Hypersonic Aircraft [J]. *Technical Physics*, 1998, 43(11): 1309-1313.
- [56] Park C, Bogdanoff D W, Mehta U B. Theoretical Performance of Frictionless Magnetohydrodynamic Bypass Scramjets [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(3): 591-598.
- [57] Park C, Mehta U B, Bogdanoff D W. Magnetohydrodynamics Energy Bypass Scramjet Performance with Real Gas Effects [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(5): 1049-1057.
- [58] Kaminaga S, Okuno Y, Yamasaki H. Quasi-One Dimensional Analysis on MHD Energy Bypass Scramjet Engine Performances [R]. *AIAA* 2003-4286.
- [59] Kuranov A L, Sheikin E G. Magnetohydrodynamic Control on Hypersonic Aircraft under "AJAX" Concept [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2003, 40(2): 174-182.
- [60] Gaitonde D V. Magnetohydrodynamic Energy-Bypass Procedure in a Three-Dimensional Scramjet [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(3): 498-510.
- [61] Gaitonde D V. Effect of Hall Currents on Simulated Three-Dimensional Scramjet with Magnetohydrodynamic

- Bypass[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(3): 700-703.
- [62] 郑小梅, 杨兴宇. 三维磁流体强化超燃冲压发动机数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(10): 2390-2400.
- [63] 吕浩宇, 李椿萱, 董海涛, 等. Hall效应对三维磁流体发生器的影响[J]. *力学学报*, 2008, 40(3): 306-314.
- [64] 于达仁, 唐井峰, 鲍文. 用于高超声速推进的MHD-Arc-Ramjet联合循环[J]. *航空学报*, 2007, 28(4): 769-775.
- [65] 于达仁, 唐井峰, 鲍文. 多级电弧对MHD-Arc-Ramjet联合循环发动机性能的影响[J]. *推进技术*, 2008, 29(6): 759-763. (YU Da-ren, TANG Jing-feng, BAO Wen. Effects of Multi-Stage Arc on the Performance of MHD-Arc-Scramjet Combined Cycle Engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(6): 759-763.)
- [66] 鲍文, 唐井峰, 于达仁. MHD-Arc-Ramjet联合循环与AJAX间的性能比较[J]. *宇航学报*, 2007, 28(1): 157-161.
- [67] Blankson I M, Schneider S. Hypersonic Engine Using MHD Energy Bypass with a Conventional Turbojet[R]. *AIAA* 2003-6922.
- [68] Benyo T L. The Effect of MHD Energy Bypass on Specific Thrust for Supersonic Turbojet Engine [R]. *AIAA* 2010-232.
- [69] Schneider S J. Annular MHD Physics for Turbojet Energy Bypass[R]. *AIAA* 2011-2230.
- [70] JP Aerospace. Year 2010 Review Picture [EB/OL]. <http://www.jp aerospace.com>, 2014.
- [71] 李益文, 李应红, 张百灵, 等. 基于激波风洞的超声速磁流体动力技术实验系统[J]. *航空学报*, 2011, 32(6): 1015-1024.
- [72] 李应红, 李益文, 苏长兵. 新概念高超声速磁流体(MHD)-涡轮联合发动机及初步实验研究[C]. 黄山: 第二届全国高超声速科技学术会议, 2009.
- [73] Yang P Y, Zhang B L, Li Y W, et al. Investigation of MHD Power Generation with Supersonic Non-Equilibrium RF Discharge[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29(4): 855-862.
- [74] 高岭, 李益文, 张百灵, 等. 高温磁流体动力技术实验系统设计与调试[J]. *推进技术*, 2015, 36(5): 774-779. (GAO-Ling, LI Yi-wen, ZHANG Bai-ling, et al. High Temperature MHD Technology System Design and Commissioning Experiments [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(5): 774-779.)
- [75] 李益文, 张百灵, 高岭, 等. 磁流体发电高温燃气的产生与控制研究[J]. *推进技术*, 2017, 38(6): 1419-1426. (LI Yi-wen, ZHANG Bai-ling, GAO Ling, et al. Research on Generation and Control of High Temperature Gas in MHD Power Generation [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(6): 1419-1426.)
- [76] 张百灵, 段成铎, 李益文, 等. 分段法拉第磁流体发电通道流动特性数值模拟[J]. *推进技术*, 2016, 37(8): 1594-1600. (ZHANG Bai-ling, DUAN Cheng-duo, LI Yi-wen, et al. Numerical Simulation of Segmented Faraday MHD Power Generation Channel Flow Field Characteristics [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(8): 1594-1600.)
- [77] Li Y W, Li Y H, Lu H Y, et al. Preliminary Experimental Investigation on MHD Power Generation Using Seeded Supersonic Argon Flow as Working Fluid [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, 24(6): 701-708.
- [78] Lineberry J T, Begg L, Castro J H, et al. Scramjet Driven MHD Power Demonstration HVEPS Program [R]. *AIAA* 2006-3080.
- [79] Lineberry J T, Begg L, Castro J H, et al. HVEPS Scramjet-Driven MHD Power Demonstration Test Results [R]. *AIAA* 2007-3880.
- [80] Lineberry J T, Begg L, Castro J H, et al. Scramjet Driven MHD Power Demonstration Test-HVEPS Project Overview [R]. *AIAA* 2006-8010.
- [81] Takahashi T, Fujino T, Ishikawa M. Comparison of Generator Performance of Small-Scale MHD Generators with Different Electrode Dispositions and Load Connection Systems [J]. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 2014, 4(3): 192-198.
- [82] Nagakubo Y, Yamashita T, Takahashi T, et al. Comparison of Generator Performance of Small-Scale Diagonal and Faraday MHD Generators [R]. *AIAA* 2010-4302.
- [83] Takahashi T, Fujino T, Ishikawa M, et al. Three-Dimensional Analysis of Power-Take-Off Regions of Experimental Scramjet Driven MHD Generator [R]. *AIAA* 2008-4330.
- [84] Takahashi T, Fujino T, Ishikawa M. Performance Analysis of Experimental-Scale Scramjet Engine Driven DCW-MHD Generator [J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2013, 1(8): 440-445.
- [85] Hardianto T, Sakamoto N, Harada N. Computational Study of a Diagonal Channel Magnetohydrodynamic Power Generation [J]. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2008, 6(2): 96-111.
- [86] Niwa N, Takahashi T, Fujino T, et al. Three-Dimensional Analysis of Generator Performance of Large-Scale DCW-MHD Generators with Circular and Square Cross-Section [R]. *AIAA* 2012-3177.
- [87] Niwa N, Takahashi T, Fujino T, et al. Performance Comparison of Scramjet-Driven Experimental DCW-MHD Generators with Different Cross Sections [J]. *Elec-*

- trical Engineering in Japan*, 2014, 187(2): 9-16.
- [88] Inoue M, Ohkuma H, Takahashi T, et al. Study of Effects of Electrode Configuration of Full-Scale Scramjet Driven DCW MHD Generator with Three-Dimensional Analysis[R]. *AIAA* 2010-4304.
- [89] Harada N, Kikuchi T, Lineberry J T. Numerical Simulation for Hypersonic Vehicle On-Board Magnetohydrodynamic Power Generation[C]. *Johor Bahru: IEEE 2nd International Power and Energy Conference*, 2008.
- [90] Bityurin V A, Bocharov A N, Popov N A, et al. To On-board MHD Power Generation[C]. *Moscow: 20th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics*, 2021.
- [91] Bityurin V A, Bocharov A N. MHD Generator Onboard Space Vehicle[J]. *Technical Physics Letters*, 2011, 37(8): 66-70.
- [92] Wie D V, Nedungadi A. Plasma Aerodynamic Flow Control for Hypersonic Inlets[R]. *AIAA* 2004-4129.
- [93] Chen G, Lee C H, Zhang J B, et al. Modeling and Parametric Studies of External MHD Generators [R]. *AIAA* 2009-1233.
- [94] 陈刚, 张劲柏, 李椿萱. 再入飞行器表面磁流体发电装置数值模拟[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36(2): 135-139.
- [95] Chen G, Zhen H, Li X, et al. Numerical Simulation of External MHD Generator on Board Reentry Vehicle [J]. *Journal of Automation and Control Engineering*, 2016, 4(4): 273-278.
- [96] Macheret S O, Shneider M N, Candler G V. Modeling of MHD Power Generation on Board Reentry Vehicles [R]. *AIAA* 2004-1024.
- [97] Miles R B, Macheret S O, Shneider M N, et al. Plasma-Enhanced Hypersonic Performance Enabled by MHD Power Extraction[R]. *AIAA* 2005-561.
- [98] Fujino T, Ishikawa M. Feasibility of an Onboard Surface Hall Magnetohydrodynamic Power Generator in Reentry Flight [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(1): 83-93.
- [99] Fujino T, Yoshino T, Ishikawa M. Prediction of Generator Performance and Aerodynamic Heating of Reentry Vehicle Equipped with On-Board Surface Hall Type MHD Generator[R]. *AIAA* 2008-4225.
- [100] Fujino T, Yoshino T, Ishikawa M. Aerodynamic Heating of Reentry Body Equipped with Onboard-Surface Hall Magnetohydrodynamic Generator [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010.
- [101] Takayama Y, Yoshino T, Fujino T, et al. Generator Performance and Aerodynamic Characteristics of Space Vehicle Equipped with On-Board Surface Hall MHD Generator[R]. *AIAA* 2009-3906.
- [102] Cristofolini A, Borghi C A, Carraro M R, et al. Hypersonic MHD Interaction on a Conical Test Body with a Hall Electrical Connection [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(2): 530-541.
- [103] Bityurin V, Bocharov A N, Baranov D S, et al. Study of MHD Flow Control and On-Board Electrical Power Generation[R]. *AIAA* 2006-1008.
- [104] Bityurin V, Bocharov A N, Baranov D S, et al. Power Extraction Experiment with a Surface MHD Generator in Hypersonic Airflow[R]. *AIAA* 2007-3882.

(编辑:朱立影)