

能量旁路组合发动机磁流体发电通道数值模拟

程邦勤, 孔维嵩, 喻永贵, 孙 权¹

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038)

摘要 利用简化的一维低磁雷诺数下磁流体动力学方程组,对理想分段法拉第型 MHD 发电通道开展了数值模拟研究,分析了电磁参数和通道几何参数的变化对 MHD 发电通道性能的影响。结果表明:MHD 发电通道能够有效减小出口气流速度,降低总温,并提取出能量,但由于电磁作用的不可逆效应以及焦耳热的产生总压有所损失。磁场强度 B 、电导率 σ 的大小,反映了通道内电磁作用强度。适度扩张型通道能够抑制出口气流速度、静温和总温,并增强电磁作用效果。要使通道出口速度减小,总温和总压降低,能量提取率增加,可以增大磁场强度 B 或电导率 σ ;反之则反向调节。

关键词 能量旁路;磁流体发电;磁场;电导率;焦耳热效应

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.04.001

中图分类号 V211.3 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)04-0001-05

对于飞行包线范围非常宽的高超声速飞行器来说,目前一般利用 2 种或 2 种以上的发动机组合起来作为高超声速飞行的推进动力^[1]。近年来研究较多的高超声速飞行器组合动力包括磁流体能量旁路冲压组合动力装置(AJAX)与磁流体能量旁路涡喷组合动力装置(MHD Energy Bypass with a Conventional Turbojet)。磁流体能量旁路概念的核心动力学过程为:利用磁流体发电通道从燃烧室前的高焓气流中提取出能量转换为电能,降低燃烧室入口处流体的速度和温度,然后将提取出来的能量通过安装在燃烧室后的磁流体加速通道返回到燃气中使燃气加速,使能量得到合理使用^[2]。

Bityurin 等人研究了磁流体能量旁路组合发动机的可行性,将磁流体动力技术的应用扩大到飞行器的飞行马赫数范围^[3]。Lee 等人对 AJAX 进行了技术论证和可行性研究,结果表明当飞行速度大于 2 134 m/s 时,AJAX 系统的优势才能体现出来^[4]。Blankson 对磁流体能量旁路涡喷组合发动机的可行性进行了仿真计算,初步的计算表明磁流体发电通道出口气流可以满足后续发动机的工作要求^[5]。日本 JAXA 与东京工业大学验证了磁流体能量旁路的可行性,结果表明把磁流体发电通道放在隔离段中效果最好^[6];长冈科技大学针对磁流体加速进行了全面细致的数值模拟研究,掌握了磁流体加速通道的基本性能^[7]。与国外相比,国内研究尚处于起步阶段。于达仁等人在 AJAX 的基础上提出一种用于高超声速推进的 MHD-Arc-Ramjet 联合循环发动机^[8-9],空军工程大学开展了等离子体流动控制和磁流体改善空气动力特性的实验研究工作,结果表明磁流体动力的动态作用对激波控制是有效的^[10-11]。

本文通过分析关键设计参数对通道性能的影响对磁流体能量旁路组合发动机的性能进行了研究。

1 数值模拟

由文献[12]可知,MHD 通道中磁流体流动的磁雷诺数 $Re_m \gg 1$ 。一般为低磁雷诺数流动。在不考虑磁流体各组分的变化的情况下,忽略热传导和摩擦损失,气体为理想气体,且比热比恒定,则包含电磁源项的磁

¹ 收稿日期:2011-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50776100)

作者简介:程邦勤(1972-),男,安徽怀宁人,副教授,博士,主要从事飞机推进系统气动热力理论和等离子体动力学及其应用研究。E-mail:cbqchina@163.com

流体欧拉方程组为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = -\nabla P + \mathbf{F}_e \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{\mathbf{u}^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{\mathbf{u}^2}{2} \right) \mathbf{u} \right] = q_g \quad (3)$$

式中: e 为气体内能, $e = C_v T = \frac{P}{(\gamma - 1)\rho}$, C_v 为定容比热, T 为气体温度; \mathbf{F}_e 为洛伦兹力, $\mathbf{F}_e = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$, \mathbf{B} 为磁场强度; q_g 为提取能量的功率密度, $q_g = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$, \mathbf{j} 为电流密度, \mathbf{E} 为电场强度。忽略 Hall 效应的影响, 这样广义欧姆定律可以简化为 $\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B})$, σ 为电导率

MHD 发电通道提取能量的比功率为:

$$w_g = \frac{W_g}{m} = \frac{\int_0^L q_g A dx}{m} \quad (4)$$

式中 A 为通道面积, 则 MHD 发电通道的能量提取率可以表示为 $\eta = w_g/w_1$, 其中 $w_1 = C_p T_1 + u_1^2/2$, T_1 和 u_1 分别为通道入口静温和速度, C_p 为定压比热。

在发电通道内, 洛伦兹力使流体减速, 转化为焦耳热 q_j 和电能 q_g , q_f 为洛伦兹力功率密度。

$$-q_f = -q_g + q_j = -\mathbf{u}(\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \quad (5)$$

对于 MHD 发电通道, 局部电效率可定义为 $\eta_{\text{local}} = q_g/q_f$ 。

容易证明 $\eta_{\text{local}} = K$, 则负载系数 K 越大, 局部电效率也越大, 则洛伦兹力的减速制动功率大部分都转化为电能提取出去; 负载系数 K 越小, 局部电效率也越小, 则洛伦兹力的减速制动功率大部分都以焦耳热的形式加入到气流中。但是若负载系数 K 过大时, 由式 $q_f = \mathbf{u}(\mathbf{j} \times \mathbf{B})$ 和 $q_g = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$ 可知会导致洛伦兹力的减速制动功率、发电通道的能量提取功率和能量提取率过小。

对于理想的分段法拉第型 MHD 发电通道, 假设整个发电通道系统与外界无热交换, 通道中的气流为理想气体, 比热比恒定, 流动为无粘定常流动, $\mathbf{B} = (0, 0, B)$, $\mathbf{j} = (0, j, 0)$, $\mathbf{E} = (0, E, 0)$, $\mathbf{u} = (u, 0, 0)$ 。设 $\mathbf{E} = K\mathbf{uB}$, 得到简化的一维低磁雷诺数下理想磁流体动力学方程组, 可由四阶龙格-库塔法求解, R 为气体常数:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{C_1 C_6 - C_2 C_5}{C_1 C_4 - C_2 C_3} \quad (6) \quad \frac{dT}{dx} = \frac{C_4 C_5 - C_3 C_6}{C_1 C_4 - C_2 C_3} \quad (7)$$

$$C_1 = \frac{\rho u^2}{T}, \quad C_2 = C_p \rho u + \frac{\rho u^3}{T}, \quad C_3 = 1 - \frac{u^2}{RT}, \quad C_4 = \frac{u^3}{RT}, \quad C_5 = \frac{\rho u^2}{A} \frac{dA}{dx} + F_{ex}, \quad C_6 = \frac{\rho u^3}{A} \frac{dA}{dx} + q_g \quad (8)$$

2 发电通道性能分析

已知 MHD 发电通道入口处的面积、气流静温、静压与马赫数, 通道长度给定, 如图 1 所示。截面 1-1 为通道入口, 截面 2-2 为通道出口, 不考虑电离所需的能量, 并假设整个发电通道中电导率均匀相等, 负载系数 $K=0.6$ 固定不变。

2.1 磁场强度、电导率对发电通道性能参数的影响

图 2 所示为发电通道的性能参数随磁场强度 B 变化的曲线图, 电导率不变, dA/dx 的值取为 0。其中 u_2, Ma_2, T_2, p_2 分别为发电通道出口速度、马赫数、静温、总温和总压, η 为发电通道的能量提取率。

图 2 中速度和马赫数减小是由于洛伦兹力的减速作用, 静温升高是由于焦耳热的影响, 总温降低则是由于提取出了能量, 总压降低是因为电磁作用的不可逆效应以及焦耳热的产生。

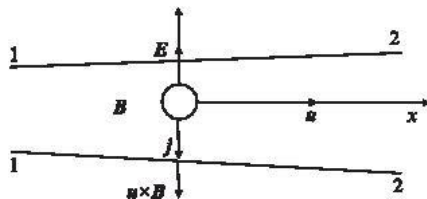


图 1 一维 MHD 发电通道坐标系

Fig. 1 Schematic diagram of one-dimensional MHD power generation channel coordinated system

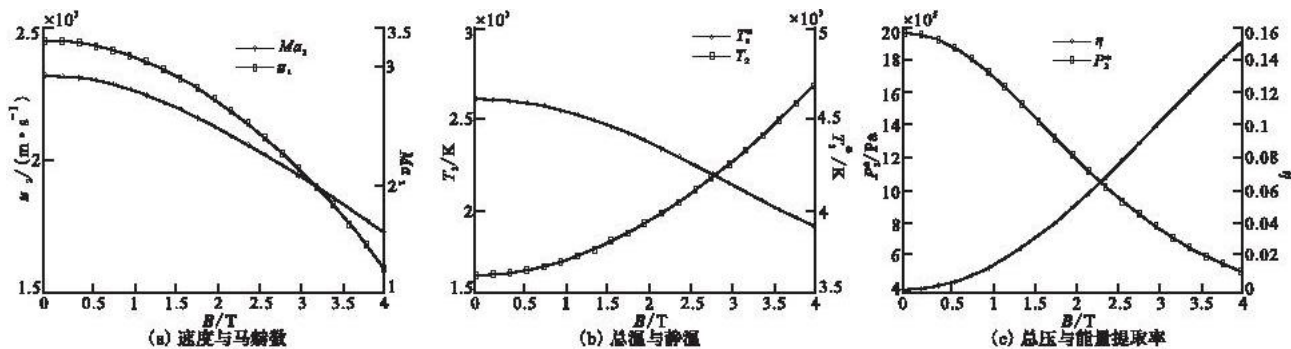


图2 磁场强度 B 对发电通道性能参数的影响

Fig. 2 Influence of magnetic field strength B on performance of MHD power generation channel

另外,磁场强度 B 越大,发电通道出口速度、马赫数减小的越多,总温和总压降低的越多,静温升高的越多,能量提取率 η 增加。这是因为在其它参数一定时,由公式 $q_f = u(j \times B) = -\sigma u^2 B^2 (1 - K)$, $q_g = j \cdot E = -K(1 - K)\sigma u^2 B^2$, $q_r = \sigma u^2 B^2 (1 - K)^2$ 和 $\eta = \left[\frac{K(1 - K) \int_0^L \frac{\sigma u B^2}{\rho} dx \right] / (C_p T_1 + u_1^2/2)$ 可知,发电通道的洛仑兹力减速制动功率、能量提取功率、焦耳发热功率以及能量提取率和磁场强度 B 的平方成正比。因此,磁场强度 B 的增加意味着电磁作用强度的增加。电导率 σ 与磁场强度 B 的影响机理相似,区别在于其它参数一定时,发电通道的洛仑兹力减速制动功率、能量提取功率、焦耳发热功率以及能量提取率和电导率 σ 成正比,这与仿真结果是吻合的。

2.2 通道型面变化率对发电通道性能参数的影响

由前面的分析可知,等截面的 MHD 发电通道会使气流速度减小,静温升高,难以同时控制速度和温度。因此考虑将 MHD 发电的减速作用和通道型面的变化结合起来,可以更加灵活地调节发电通道出口处的性能参数。图 3 所示为发电通道的性能参数随通道型面变化率 dA/dx 变化的曲线图,电导率 $\sigma = 15 \text{ S/m}$, 磁场强度 $B = 4 \text{ T}$ 。

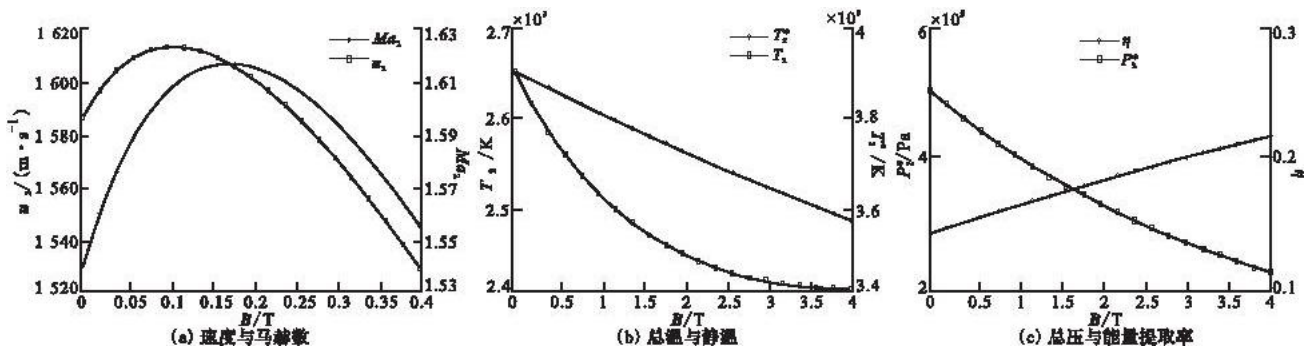


图3 通道型面变化率对发电通道性能参数的影响

Fig. 3 Influence of channel profiles change rate on performance of MHD power generation channel

由图 3 可见, dA/dx 在 $0 - 0.4$ 范围内变化时,通道出口处的速度和马赫数先增加后减小,这是因为 dA/dx 增加较小时,通道型面变化对速度和马赫数的影响大于电磁作用的影响,使得通道出口处的速度和马赫数增加;进一步增加 dA/dx 的值时,通道中洛仑兹力的减速作用增强,电磁作用对速度和马赫数的影响大于通道型面变化的影响,从而导致通道出口处的速度和马赫数减小。同时,随着 dA/dx 的值增加,通道出口处的静温降低,这是因为通道型面变化对静温的影响大于电磁作用的焦耳发热的影响。由于增加 B 的值会使得发电通道后部的电磁作用强度增加,从而导致从通道中提取出来的能量和焦耳热越多,故而发电通道出口处的总温和总压随着 dA/dx 的值增加而降低,能量提取率则随着 dA/dx 的值增加而增加。

2.3 有无 MHD 作用通道性能参数对比分析

由前面的分析可知,通过改变磁场强度 B 、电导率 σ 以及通道型面变化率 dA/dx 的大小可以在一定范围内改变发电通道出口处性能参数的大小。而使用 MHD 发电通道的主要目的是为了同时控制燃烧室入口处的速度和温度,使它们满足工程上的限制条件,总的来说是要减小气流的速度,降低总温,使静温降低或不变以及总压损失较小。图 4 所示为通道中的气流参数沿 x 轴变化的曲线图,其中磁场强度为 $B = 4 \text{ T}$, 电导率

为 $\sigma = 10 \text{ S/m}$, dA/dx 的值取为 0.15。

由图 4 可见,与无 MHD 作用相比,洛仑兹力的减速作用使得通道出口处的气流速度减小了 6.2%,马赫数减小了 12.5%。通道中的静温先降低后升高,这是因为在通道前段,通道型面变化的影响大于电磁作用的焦耳热的影响,使得静温降低;在通道后段,通道截面积增加使得电磁作用的焦耳热对静温的影响大于通道型面变化对静温的影响,从而静温升高;整个通道中静温变化幅度很小,通道出口静温比通道入口静温略有降低。与无 MHD 作用相比,通道出口处的总温降低了 4.3%。然而发电通道的长度、截面积和型面变化率在飞行过程中往往是不能改变的,只能通过调节电磁参数来调节发电通道出口处的性能参数。

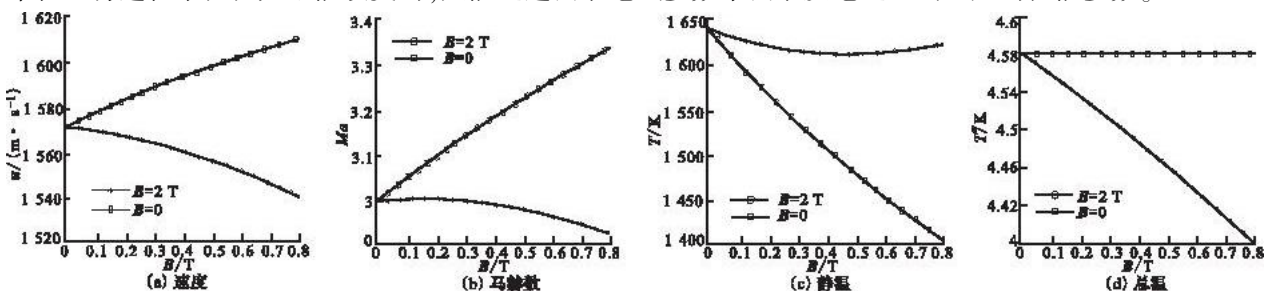


图 4 $B = 2 \text{ T}$, $\sigma = 10 \text{ S/m}$, $dA/dx = 0.15$ 时气流参数沿 x 轴向分布

Fig. 4 x axial distribution of flow parameter in $B = 2 \text{ T}$, $\sigma = 10 \text{ S/m}$, $dA/dx = 0.15$

3 结论

本文利用简化的一维低磁雷诺数下磁流体动力学方程组,对理想分段法拉第型 MHD 发电通道开展数值模拟研究,结果表明:①MHD 发电通道能够有效减小出口气流速度,降低总温,并提取出能量,但由于电磁作用的不可逆效应以及焦耳热的产生总压有所损失;②磁场强度 B 、电导率 σ 的大小反映了通道内电磁作用强度;③适度扩张型通道能够抑制出口气流速度、静温和总温,并增强电磁作用效果;④要使通道出口速度、马赫数减小,总温和总压降低,能量提取率增加,可以增大磁场强度 B 或电导率 σ ;反之则反向调节。

参考文献 (References):

- [1] 刘大响, 金捷. 21 世纪世界航空动力技术发展趋势与展望[J]. 中国工程科学, 2004, 6(9): 1-8.
LIU Daxiang, JIN Jie. The development trends and prospect of world aeropropulsion technology in the 21st century [J]. Engineering science, 2004, 6(9): 1-8.
- [2] Ying Ming Lee, Czysz Paul A, Claudio Bruno. Implementation of magnetoHydrodynamic energy bypass process for hypersonic vehicles[J]. Acta astronautica, 2004, 55: 433-441.
- [3] Bituryn V A, Lineberry J T, Litchford R J, et al. Thermodynamic analysis of the AJAX propulsion concept (invited) [R]. AIAA 2000-0445.
- [4] Lee Y M, Czysz P A, Petley D. MagnetoHydrodynamic energy bypass application for single stage-to-orbit vehicles [R]. AIAA 2001-1901.
- [5] Blankson I M, Stephen Schneider. Hypersonic engine using MHD energy bypass with a conventional Turbojet [R]. AIAA 2003-6922.
- [6] Kaminaga S, Tomioka S, Yamasaki H. Feasibility study on MHD energy bypass scramjet engine [R]. AIAA 2005-3226.
- [7] Anwari M, Takahashi S, Harada N. Numerical simulation for performance of an MHD accelerator [R]. AIAA 2004-2363.
- [8] 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.
YU Daren, TANG Jingfeng, BAO Wen. MHD-Arc-Ramjet combined cycle for hypersonic propulsion [J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2007, 28(4): 769-775.
- [9] 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.
BAO Wen, TANG Jingfeng, YU Daren. Comparative analysis about performance between MHD-Arc-Ramjet combined cycle and AJAX [J]. Journal of astronautics, 2007, 28(1): 157-161.
- [10] 王健, 李应红, 程邦勤, 等. 等离子体气动激励控制激波的实验研究 [J]. 航空学报, 2009, 30(8): 1374-1379.
WANG Jian, LI Yinghong, CHENG Bangqin, et al. Experimental investigation on shock wave control by plasma aerodynamic actuation [J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2009, 30(8): 1374-1379.

- [11] 王健, 李应红, 程邦勤, 等. 等离子体气动激励控制激波的机理研究[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5513 – 5519.
WANG Jian, LI Yinghong, CHENG Bangqin, et al. The mechanism investigation on shock wave controlled by plasma aerodynamic actuation[J]. Acta physica sinica, 2009, 58(8): 5513 – 5519.
- [12] Nakamura T, Riedmuller W. Stability of nonequilibrium MHD plasma in the region of fully ionized seed[J]. AIAA journal, 1974, 12(5): 661 – 668.

(编辑:徐敏)

Numerical Simulation Investigation on MHD Power Generation Channel of Energy Bypass Combined Engine

CHENG Bang – qin, KONG Wei – song, YU Yong – gui, SUN Quan,

(School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China)

Abstract: With simplified one – dimensional low magnetic Reynolds number MHD equations, this paper involves study on the numerical simulation of ideal Faraday MHD power generation channel, analyzing influence that the change of electromagnetic parameters and channel geometry parameters have on the performance of MHD power generation channel. Results show that MHD power generation channel can reduce flow velocity and total temperature, and extract energy effectively. However, it can inflict losses upon total pressure because of electromagnetic irreversible and Joule heat effects. Increasing of magnetic field strength and electric conductivity means role in enhancing of electromagnetic. A reasonable expand channel can efficiently refrain from static temperature, flow velocity and total temperature at the exit, and get the favorable influencing factors of electromagnetic. Effect of decreasing in outlet velocity, total temperature as well as total pressure and increasing in extracting – energy – rate can be received by enhancing parameters such as magnetic field strength, electric conductivity. Otherwise, magnetic field strength and electric conductivity should be diminished.

Key words: energy bypass; MHD power generation; magnetic field; electric conductivity; Joule heat effect.

本刊相关链接文献:

- [1] 王文栋, 陈策, 张生良, 等. 基于小波的主燃油控制通道动态奇异数据辨识[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2003, 4(6): 20 – 22.
- [2] 李应红, 吴云, 宋慧敏, 等. 大气压等离子体流动控制实验[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2006, 7(3): 1 – 3.
- [3] 何立明, 苏建勇, 白晓峰, 等. 等离子体气动激励改善气膜冷却效率的数值研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2008, 9(3): 1 – 5.
- [4] 李应红, 梁华, 吴云, 等. 等离子体气动激励建模仿真综述[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2008, 9(5): 1 – 5.
- [5] 程邦勤, 孙权, 苏长兵, 李益文, 喻永贵. 磁流体流动控制在航空工程中的应用与发展[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2010, 11(2): 11 – 15.
- [6] 郭飞飞, 王如根, 夏钦斌, 等. 射流角度对固定几何结构二元喷管气动喉道的影响[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2010, 11(3): 26 – 29.
- [7] 郭飞飞, 王如根, 赵彪, 等. 比热变化对激波诱导气动矢量喷管影响的数值研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(5): 15 – 19.
- [8] 赵光银, 梁华, 吴云, 等. 不同时间尺度等离子体气动激励特性的测试诊断[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(5): 20 – 24.
- [9] 李应红, 吴云. 等离子体流动控制技术研究进展[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2012, 13(3): 1 – 5.