

多级电弧对 MHD-Arc-Ram jet联合循环 发动机性能的影响*

于达仁, 唐井峰, 鲍 文

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: MHD-Arc-Ram jet联合循环发动机中电弧数目的增加会改变发动机的循环结构, 影响发动机的性能。理论上分析了 MHD-Arc-Ram jet联合循环发动机中电弧数目的增加对发动机单位推力的影响, 讨论了电弧数目趋于无穷大时的发动机性能, 定量给出了不同电弧数目下的发动机单位推力。结果表明, MHD-Arc-Ram jet联合循环发动机的单位推力随着电弧数目的增加而增加; 当电弧数目趋于无穷大时, 发动机单位推力存在最大值; 增加电弧数目所获得的发动机单位推力的增益随着电弧数目的增加而不断减缓。

关键词: MHD-Arc-Ram jet联合循环发动机; 多级电弧; 性能分析; AJAX

中图分类号: V231.12 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2008) 06-0759-05

Effects of multi-stage arc on the performance of MHD-Arc-Ram jet combined cycle engine

YU Da-ren, TANG Jing-feng BAO Wen

(School of Energy Science and Engineering Harbin Inst. of Technology Harbin 150001, China)

Abstract The increase of the arc stage number of MHD-Arc-Ram jet combined cycle engine will cause the change of engine thermal cycle configurations and affect engine performance. The effect of the increase of the arc stage number on the engine specific thrust is theoretically analyzed. The specific thrust at the condition that the arc stage number approaches infinite is investigated. The specific thrust for the different arc stage number cases is provided. The results show that the engine specific thrust will increase with the arc stage number; that the maximum specific thrust will be produced when the arc stage number approaches infinite; and that the increment of the specific thrust will diminish with the increase of the arc stage number.

Key words MHD-Arc-Ram jet combined cycle engine; Multistage arc; Performance analysis; AJAX

1 引 言

近年来带有能量旁路的冲压发动机吸引了国内外高超声速推进领域的广泛关注。在这种发动机中, 来流经过进气道的激波压缩后进入能量取出通道中, 气流的一部分能量(总焓)被取出; 具有较低温度和速度的气流进入燃烧室中和燃料混合、燃烧; 随后在能量注入通道中将前端取出的能量返回给气流, 并在

尾喷管中膨胀、加速。结构上燃烧室前、后端的能量取出通道和能量注入通道形成了发动机中的能量传递旁路。(发动机循环温—熵图见图 1^[1]。)

MHD-Arc-Ram jet联合循环发动机作为一种带有能量旁路的冲压发动机^[1~3], 其利用置于燃烧室前端的磁流体发电通道和置于尾喷管中的电弧来构成发动机的能量传递旁路。随着来流状态的变化, 改变磁流体发电通道的电能输出量, 取出的电能可在尾喷管中

* 收稿日期: 2007-09-08 修订日期: 2007-12-13。

基金项目: 国家自然科学基金 (50306003); 国家“八六三”计划 (2002AA722105); 中国航天科技集团公司航天科技创新基金 (CASC0303)。

作者简介: 于达仁 (1966—), 男, 博士, 教授, 研究领域为高超声速推进系统、等离子推进系统。

E-mail yudarer@hust.edu.cn

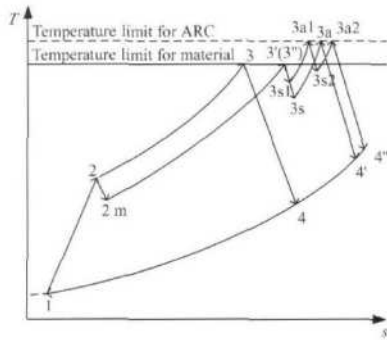


Fig 1 Temperature-entropy cycle diagram of ram jet

不同位置的电弧处以不同的比例进行注入;能量传递旁路的运行将引起此发动机的循环结构相对于布雷顿循环 (Brayton cycle) 出现明显差异 (图 1 中循环 1-2-2m-3'-3s-3a-4'-1 和 1-2-3-4-1 之间的差异), 这是带有能量旁路的冲压发动机的特殊之处;电弧数目的不同将引起此发动机的循环结构出现细节性的变化 (图 1 中循环 1-2-2m-3'-3s-3a-4'-1 和 1-2-2m-3''-3s1-3a1-3s2-3a2-4''-1 之间的差异), 这是 MHD-Arc-Ram jet 联合循环发动机的特殊之处。

对于能量传递旁路的运行所引起的发动机循环结构变化, 文献 [4-5] 采用热力学方法详细地进行了带有能量旁路的冲压发动机的循环过程分析, 文献 [6-8] 基于准一维模型分析了此发动机的性能;结果表明^[4-8]: 带有能量旁路的冲压发动机的特殊循环相对于 Brayton 循环而言, 在改善发动机在高超声速区域内的性能, 扩展发动机的运行范围方面具有明显的优势。相对于此, MHD-Arc-Ram jet 联合循环发动机中电弧数目的不同也会改变发动机的循环结构, 进而影响发动机的性能。电弧数目的不同对于 MHD-Arc-Ram jet 联合循环发动机性能的影响规律和程度如何, 是值得关注的问题。

本文首先理论分析了 MHD-Arc-Ram jet 联合循环发动机随着电弧数目的增加所产生单位推力性能增益, 讨论了电弧数目趋近于无穷大时的性能极限, 定量给出了不同电弧级数下的发动机单位推力。其分析结论对于 MHD-Arc-Ram jet 联合循环发动机的电弧设计具有指导作用。

2 多级电弧注入的发动机性能分析

2.1 电弧数目增加 ($k \rightarrow (k+1)$ 级) 所引起的发动机性能增益

为了分析的普适性, 下面讨论电弧数目由 $k (k \in \{1, 2, 3, \dots\})$ 级增加到 $(k+1)$ 级时发动机的性能增

益。采用多级电弧的特殊之处, 在于能量以不同的比例在不同位置的电弧处实现能量注入。在保持燃烧室出口以前发动机结构、部件性能以及来流状态均不变的情况下, 仅仅考察由于电弧数目的增加所引起的发动机性能变化, 分析过程依赖于以下假设条件:

(1) 工质为理想气体。

(2) 发动机来流在进气道中进行等激波角的四道绝热压缩 (过程 1-2); 忽略由于燃料注入所引起质量增加以及由于摩擦和热损失所引起的动量降低, 假设燃烧 (过程 2m-3) 中压力、速度恒定; 尾喷管中进行理想的膨胀过程, 不考虑膨胀中的耗散。

磁流体发电通道 (过程 2-2m) 中气流动能和电能之间的转换在等温条件下进行, 发电回路中内阻产生的热量导致此过程出现熵增^[9]。

(3) 电弧能量注入过程相当于燃烧室中的能量注入过程。

(4) 基于上述假设下的 MHD-Arc-Ram jet 联合循环发动机的循环温-熵图如图 2 所示。电弧注入过程为 $3 \rightarrow 3s1 \rightarrow 3a1 \rightarrow \dots \rightarrow 3si \rightarrow 3ai \rightarrow \dots \rightarrow 3sk \rightarrow 3ak$, 其中第 i 级膨胀过程为 $3a(i-1) \rightarrow 3si$, 第 i 级电弧注入过程为 $3si \rightarrow 3ai$, $i \in \{1, 2, \dots, k\}$, $i=1$ 时 $3a(i-1)$ 点对应于 3 点。根据能量守恒原理可得第 i 级膨胀、电

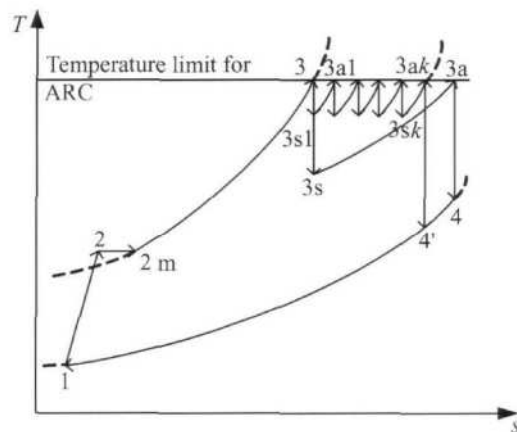


Fig 2 Temperature-entropy cycle diagram of MHD-Arc-Ram jet combined cycle engine

弧注入过程 $3a(i-1) \rightarrow 3si \rightarrow 3ai$ 中

$$\begin{cases} h_{3a(i-1)} + \frac{v_{3a(i-1)}^2}{2} = h_{3si} + \frac{v_{3si}^2}{2} \\ \eta_t \eta_{arc} N_g + (h_{3si} + \frac{v_{3si}^2}{2}) = h_{3ai} + \frac{v_{3ai}^2}{2} \end{cases} \quad (1)$$

即

$$\eta_t \eta_{arc} N_g + h_{3a(i-1)} + \frac{v_{3a(i-1)}^2}{2} = h_{3ai} + \frac{v_{3ai}^2}{2} \quad (2)$$

式中 η_i 为第 i 级电弧注入过程中能量分配比例, $(\sum_{i=1}^k \eta_i = 1)$; η_{arc} 为电弧能量注入的能量利用率^[10]; N_g 为磁流体发电通道中取出的电能; h, v 分别为气流的静焓、速度; 下标标注参考图 2。

联立各级电弧注入过程的能量守恒关系, 基于式 (2) 可推得

$$(\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_k) \eta_{arc} N_g + (h_3 - h_{4'}) = \frac{v_{4'}^2}{2} - \frac{v_3^2}{2} \Rightarrow \eta_{arc} N_g + (h_3 - h_{4'}) = \frac{v_{4'}^2}{2} - \frac{v_3^2}{2} \quad (3)$$

由式 (3) 可见, 在电弧注入的总能量 N_g 一定的情况下, 发动机出口速度 (v_4 或 $v_{4'}$) 仅仅依赖于发动机出口处的静焓 (h_4 或 $h_{4'}$)。

此外整个电弧注入过程 ($3 \rightarrow 3s1 \rightarrow 3a1 \rightarrow \dots \rightarrow 3si \rightarrow 3ai \rightarrow \dots \rightarrow 3sk \rightarrow 3ak$) 中的熵增为

$$\Delta s = \sum_{i=1}^k \frac{\eta_i}{T_i} \eta_{arc} N_g \quad (4)$$

式中 $\bar{T}_i$ 为第 i 级电弧注入过程的平均温度。明显地 $\bar{T}_i < T_{lm}$ 。

以下考虑电弧数目由 k 级增加到 $(k+1)$ 级所引起的发动机性能改变。假设这种增加仅仅是把第 j 级电弧注入的能量 $\eta_j \eta_{arc} N_g$ 以比例 η_j 和 η_{j+1} 分别在两级电弧中注入。 $\eta_j + \eta_{j+1} = 1$, $\eta_j \in (0, 1)$, $\eta_{j+1} \in (0, 1)$, $j \in \{1, 2, \dots, k\}$ 。当采用 k 级电弧实现能量注入时, 其中第 j 级电弧注入的熵增为

$$\Delta s_j = \frac{\eta_j}{T_j} \eta_{arc} N_g = (\frac{\eta_j}{T_j} + \frac{\eta_{j+1}}{T_j}) \eta_j \eta_{arc} N_g \quad (5)$$

同理, 当采用 $(k+1)$ 级电弧实现能量注入时, 可得

$$\Delta s_j + \Delta s_{j+1} = (\frac{\eta_j}{T_j} + \frac{\eta_{j+1}}{T_{j+1}}) \eta_j \eta_{arc} N_g \quad (6)$$

在电弧能量注入过程中, 能量的注入导致温度的提高。明显地

$$\Delta T_j > \Delta T_{j'}, \Delta T_j > \Delta T_{j+1} \quad (7)$$

考虑到电弧注入过程均加热气流到达材料耐温和冷却的极限温度 T_{lm} (此时对应于发动机最大性能), 结合式 (7) 可得

$$\bar{T}_j < \bar{T}_{j'}, \bar{T}_j < \bar{T}_{j+1} \quad (8)$$

联立式 (5)、(6)、(8), 可得

$$\Delta s_j > \Delta s_{j'} + \Delta s_{j+1} \quad (9)$$

可见, 电弧数目由 k 级增加到 $(k+1)$ 级进行能量注入, 会引起电弧注入过程的总熵增减小。这就意

味着图 2 中 $4'$ 点位于 4 点的左侧。(图 2 中示意地表示了多级与单级电弧) 明显地

$$h_3 - h_{4'} > h_3 - h_4 \quad (10)$$

联立式 (3)、(10) 可知, $v_{4'} > v_4$ 。根据发动机单位推力的定义 $F_{sp} = F/m \propto v_{ex} - v_i$ (v_i, v_{ex} 分别为发动机入口和出口处的速度) 可得: 在电弧数目 k 级的基础上增加一级 (至 $k+1$ 级) 进行能量注入, 会导致 MHD-Arc-Ram jet 联合循环发动机的单位推力出现正增益。

由 $k (k \in \{1, 2, 3, \dots\})$ 的任意性可知, MHD-Arc-Ram jet 联合循环发动机中增加用于能量注入的电弧数目均会引起发动机的单位推力出现正增益。

2.2 电弧数目 $k \rightarrow \infty$ 时发动机性能极限

电弧数目 k 的增加会引起发动机的单位推力出现正增益, 那么当 $k \rightarrow \infty$ 时发动机的单位推力是趋于无穷大, 还是存在极限值, 这是需要回答的问题。

当电弧数目 $k \rightarrow \infty$ 时, 根据上面的定义可得

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \eta_k = 0 \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \bar{T}_k = T_{lm} \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \Delta T_k = 0 \quad (11)$$

这就是说 $k \rightarrow \infty$ 时相当于存在无穷多级的电弧微元, 每一级电弧微元均在最高温度下实现无穷小量的能量注入, 其过程中温度的变化量趋近于零。或者说, 在最高温度 T_{lm} 下把能量直接转化为工质的动能, 工质的内能 (温度不变) 不变, 所对应的发动机性能与 $k \rightarrow \infty$ 情况下的性能是相等的。可见, 发动机的单位推力在 $k \rightarrow \infty$ 时存在着一个最大值。

值得注意的是, 俄罗斯学者提出的带有能量旁路的冲压发动机——AJAX^[2, 4, 6, 8]: 其利用置于燃烧室前部的磁流体发电通道, 和置于燃烧室后端的磁流体加速通道来构成能量传递旁路。在理想条件下 (不考虑磁流体加速通道的线圈内阻和各种电磁效应), AJAX 发动机的磁流体加速通道把电能全部转化为工质的动能, 能量注入过程中气流的内能 (温度) 保持恒定。可见, 理想情况下 AJAX 的磁流体加速通道中的能量转换机理和 $k \rightarrow \infty$ 时 MHD-Arc-Ram jet 联合循环发动机的电弧注入过程中的机理是相同的, 即把电能全部转化为工质的动能, 能量注入过程中气流的内能 (温度) 保持恒定。可见, 理想条件下 AJAX 的单位推力和 $k \rightarrow \infty$ 条件下 MHD-Arc-Ram jet 联合循环发动机的单位推力, 在数值上是相等的。

对于 MHD-Arc-Ram jet 联合循环发动机而言, 发动机的单位推力随着电弧数目的增加而不断逼近这

个极限值,但由于实际中不可能实现无穷多级电弧而不能达到;而对于 A JAX 而言,这个极限值由于受物理实际约束的存在(不可能实现电路回路零内阻等)而不可能达到。在极限或者理想条件下, MHD-Arc-Ram jet联合循环与 A JAX 这两种带有能量旁路的冲压发动机的单位推力是相等的;在实际条件(考虑有限级电弧和物力约束条件)下,比较这两种发动机的性能是值得开展的工作^[3]。

2.3 不同电弧数目下的发动机性能

由上面的分析可知,随着电弧数目 k 的增加, MHD-Arc-Ram jet联合循环发动机的单位推力不断增加,并且当 $k \rightarrow \infty$ 时发动机的单位推力存在着最大

值。下面借鉴文献[11]中关于 MHD-Arc-Ram jet联合循环发动机内部流动的准一维分析方法,给出不同 k 下发动机的单位推力。图 3 给出了 MHD-Arc-Ram jet联合循环发动机的单位推力的相对数值 ($U = \frac{F_{spk}}{F_{sp1}} \times 100\%$, $V = \frac{F_{spk+1} - F_{spk}}{F_{spk}} \times 100\%$) 与电弧数目 k 之间的关系。其中,多级电弧注入时每级电弧的能量分配比例 η_i 是均等的; F_{spk} 为采用 k 级电弧时发动机的单位推力; Ma_1 , v_1 为自由来流的马赫数和速度,来流按照等动压条件 $q_1 = 45 \text{ kPa}$ 进行考虑,来流特性依据标准空气特性表^[12]查找;发动机部件的特征参数和文献[11]中的选取一致。

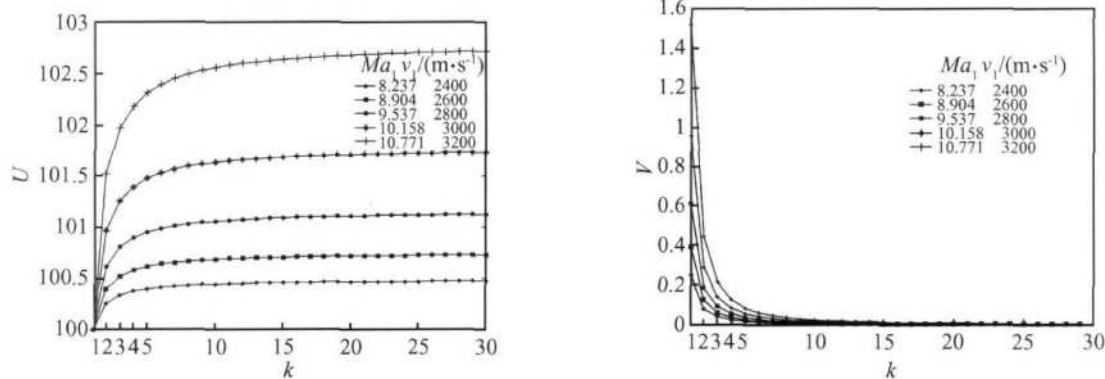


Fig. 3 Relative specific thrust for different k -stage arc cases

计算结果表明:随着电弧数目的增加,发动机的单位推力不断提高,并趋近于一个极限值,这是和上面的理论分析一致:这种规律和来流速度和部件特征参数的取值无关。

同时,当电弧数目较小时,增加一级电弧所带来的单位推力增益非常明显;这种单位推力的增加量随着电弧数目的增多而不断减缓。例如,对于马赫数 $Ma_1 = 9.537$ 的来流, $k = 2$ 时发动机单位推力相对于 $k = 1$ 时增加了 0.61%, 占极限条件下总增量的 54.46%; $k = 3$ 发动机单位推力相对于 $k = 2$ 时增加了 0.19%, 占极限条件下总增量的 16.78%。可见,从发动机性能增益的角度讲,并不是电弧数目越多越好;考虑到发动机结构的复杂性、运行的可靠性和设计成本等因素,选择合理的电弧数目是值得探讨的。

3 结 论

MHD-Arc-Ram jet联合循环发动机中电弧数目的增加会改变发动机的循环结构,进而影响到发动机的

性能。本文首先理论分析了 MHD-Arc-Ram jet联合循环发动机中电弧数目的增加对发动机单位推力的影响,指出增加电弧数目对于提高发动机单位推力有利;随后探讨了电弧数目趋于无穷大的极限情况,指出此时发动机单位推力存在最大值,这个最大值与 A JAX 在理想条件下的性能极限在数值上相等;最后定量地给出了不同电弧数目下的发动机单位推力,表明增加电弧数目所获得发动机单位推力增益随着电弧数目的增加而不断减缓。考虑到发动机结构的复杂性、运行的可靠性和设计成本等因素,选择合理的电弧数目是值得开展的工作。

致 谢: 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院严家禄教授对本文工作进行了大力指导,特此感谢。

参考文献:

- [1] Tang J F, Bao W, Yu D R. A new manner for energy re-introduction in A JAX [R]. AIAA 2006-8101.
- [2] 于达仁,唐井峰,鲍文.用于高超声速推进的 MHD-Arc-Ram jet联合循环[J].航空学报,2007,28

- (4).
- [3] 鲍 文, 唐井峰, 于达仁. MHD-Arc-Ram jet 联合循环与 AJAX 间的性能比较 [J]. 宇航学报, 2007, 28(1).
- [4] Litchford R J, Cole J W, Biturin V A. Thermodynamic analysis of magneto-hydrodynamic-bypass hypersonic air-breathing engines [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(2).
- [5] Tang J F, Bao W, Yu D R. The influence of energy-bypass on the performance of AJAX [R]. AIAA 2006-1376
- [6] Fraishtadt V L, Kuranov A L, Sheikin E G. Use of MHD systems in hypersonic aircraft [J]. *Technical Physics* 1998, 43(11).
- [7] Park C, Bogdanoff D W, Mehta U B. Theoretical performance of frictionless magneto-hydrodynamic-bypass scram jets [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(3).
- [8] Kuranov A L, Sheikin E G. Magneto-hydrodynamic control on hypersonic aircraft under AJAX concept [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2003, 40(2).
- [9] Burakhanov B M, Likhachev A P, Medin S A. Advancement of scram jet magnetohydrodynamic concept [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(6).
- [10] 廖宏图, 吴铭岚, 汪南豪. 电弧喷射推力器内部工作过程研究综述 [J]. 推进技术, 1999, 20(3). (LIAO Hong-tu, WU Ming-lan, WANG Nan-hao. Survey of internal process studies on arcjet thrusters [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1999, 20(3).)
- [11] 唐井峰, 鲍 文, 于达仁. MHD-Arc-Scram jet 联合循环发动机的性能分析 [J]. 推进技术, 2008, 29(4). (TANG Jing-feng, BAO Wen, YU Da-ren. Performance of MHD-Arc-Scram jet combined cycle engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(4).)
- [12] Anonymous. U. S. Standard atmosphere [M]. U. S. Government Printing Office, Washington, DC Oct. 1976

(编辑: 朱立影)

(上接第 746 页)

- [3] Narendra K S, Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks [J]. *IEEE Trans Neural Networks*, 1990, 22(1).
- [4] Chai T Y. Multivariable intelligent decoupling control and its application [C]. *Hefei Proceedings of the 3th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2000
- [5] 朱玉斌, 樊思齐, 任新宇, 等. 基于 DRNN 网络的航空发动机多变量解耦控制 [J]. 推进技术, 2006, 27(2). (ZHU Yu-bin, FAN Si-qi, REN Xin-yu, et al. A multivariable decoupling control based on DRNN for aeroengine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(2).)
- [6] 刘建勋, 李应红, 陈永刚, 等. 航空发动机递归神经网络分路式解耦控制 [J]. 航空动力学报, 2005, 20(2).
- [7] 任新宇, 樊思齐. 航空发动机多变量自学习模糊解耦控制 [J]. 推进技术, 2004, 25(6). (REN Xin-yu, FAN Si-qi. Aero-engine multivariable learning fuzzy decouple control [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(6).)
- [8] 彭靖波, 谢寿生, 王运生, 等. 基于遗传算法的发动机控制通道数学模型辨识 [J]. 推进技术, 2007, 28(6). (Peng Jing-bo, Xie Shou-sheng, Wang Yun-sheng. Mathematic model identification of aero-engine main control passage based on genetic algorithm [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(6).)
- [9] 郭迎清. 航空发动机神经网络自适应控制研究 [J]. 航空动力学报, 2001, 16(1).

(编辑: 郭振伶)