

# Performance Analysis for Ideal Faraday-Type Magnetohydrodynamic (MHD) Channel

Feng Chen

High Speed Aerodynamics Research Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan

Email: [chenfeng\\_2011@126.com](mailto:chenfeng_2011@126.com)

Received: Aug. 16<sup>th</sup>, 2016; accepted: Sep. 10<sup>th</sup>, 2016; published: Sep. 14<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In order to investigate the influence of magnetic interaction parameter and load factor on the performance of ideal faraday-type magnetohydrodynamic (MHD) channel, a one-dimensional ideal faraday-type MHD channel model is built. The local and global influence disciplinary of the magnetic interaction parameter, load factor and Mach number on the MHD channel is obtained by the analysis of the differential equations and numerical results at the power output and input model. The magnetic interaction parameter has a linear effect on the MHD channel, and the load factor determines the Mach number and speed trends. The channel size, Mach number and load factor should be considered to optimize the design of MHD channel.

## Keywords

MHD Channel, MHD Generation, MHD Acceleration, Load Factor, Magnetic Interaction Parameter

---

# 理想法拉第型磁流体通道特性分析

陈 峰

中国空气动力研究与发展中心, 高速空气动力学研究所, 四川 绵阳

Email: [chenfeng\\_2011@126.com](mailto:chenfeng_2011@126.com)

文章引用: 陈峰. 理想法拉第型磁流体通道特性分析[J]. 流体动力学, 2016, 4(3): 43-53.

<http://dx.doi.org/10.12677/ijfd.2016.43006>

## 摘要

为了获得负载系数、磁作用数等参数对理想法拉第磁流体通道特性的影响规律，本文建立了理想法拉第型磁流体通道一维数学模型。在磁流体通道电能输出和输入模式下，通过对微分方程及数值结果进行分析，获得了磁作用数、负载系数、马赫数等参数对磁流体通道的局部及整体特性的影响规律。磁作用数对磁流体通道参数影响成线性关系，磁作用数越大，磁流体动力效应越显著；负载系数取值决定了马赫数或速度的变化趋势；在设计磁流体通道时应综合考虑通道尺寸，马赫数变化，合理选择负载系数，使磁流体通道性能达到最优。

## 关键词

磁流体通道，磁流体发电，磁流体加速，负载系数，磁作用数

## 1. 引言

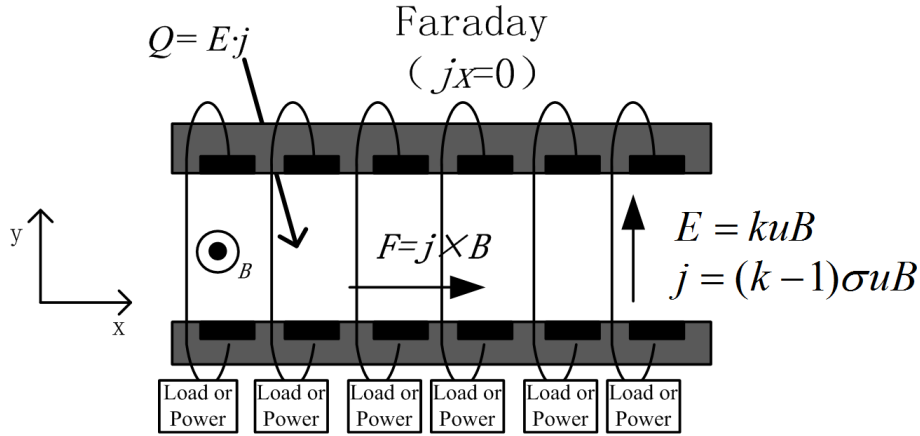
磁流体动力技术综合了电磁学、空气动力学和化学动力学等技术，被认为有可能带来高超声速飞行器性能的突破。早在 1957 年的时候，Resler 和 Sears 就在国际航空会议上提出了磁控气动力学 (magneto-aerodynamics) 的概念，他们指出可以利用磁控气动力学来对通道中的电离流体进行加速和减速[1]。近年来，针对超导磁材料的研究发展和人工电离技术的进步[2]-[4]，使运用磁流体动力技术控制高超声速飞行器外部和内部流动的潜在应用成为了可能。例如飞行器飞行范围向高超声速区域扩展，发动机进口温度高，气体发生热离解，限制可向燃烧室加入的热量，发动机单位推力急剧降低。为使发动机向更高飞行速度扩展，上世纪 90 年代俄罗斯学者在 AJAX 计划中，提出磁流体能量旁路(MHD energy-bypass) 的概念[5]，其基本原理为利用磁流体发电机从燃烧室前的气流中提取能量转换为电能，降低燃烧室入口气流的速度、温度，从进气道提取的一部分能量再通过燃烧室后的磁流体加速装置，注入到燃气流中，对燃气流进行加速，从而增大推力。磁流体能量旁路的应用扩大了飞行器的飞行范围，但是由于磁流体设备引起熵增并不能提高总体性能[6]。

本文通过建立一维等截面理想分段法拉第磁流体通道模型，分析了磁流体通道参数对流动特性的影响规律，为正确应用磁流体动力技术，合理选择磁流体通道参数提供了理论参考。

## 2. 磁流体动力技术基本原理

磁流体动力技术基本原理仍是法拉第电磁感应定律，如图 1，其应用一般包括磁流体发电和磁流体加速两种方式。磁流体发电的主要作用是对来流气体进行功率提取，使流体的部分热能或动能转化为电能，同时会使气流的温度或速度降低。导电流体以速度  $u$  流入磁流体发电通道，受到磁场作用带电离子在磁流体通道内向上下极板偏转，并在上下极板形成电荷积累，产生电场  $E$ 。在两极接上负载，就会产生垂直于气流方向上的电流，该电流会使流体受到和流动方向相反的力。磁流体加速可以看作是磁流体发电过程的逆过程，作用原理是在导电流体中注入电能，利用电流与磁场相互作用产生顺气流方向的电磁体积力，实现对导电流体的加速作用。另外如果施加反方向的电流，则产生的洛伦兹力方向与气流方向相反，起到对气流的减速作用。

实际上磁流体动力技术的物理机制要复杂得多，由于带电粒子迁移速率的不同，磁流体通道中还存在



**Figure 1.** Schematic diagram of MHD technical  
**图 1.** 磁流体动力技术原理示意图

在着霍尔效应的作用[7]，在平行于气流的方向上会有霍尔电场或霍尔电流的形成。分段法拉第型磁流体通道，将电极进行分段，这样对霍尔电流来说，电路是断开的，因此可以减小霍尔效应的不利影响。

一般磁流体动力效应包括两个方面[8]：

- 1) 洛伦兹力效应，电磁场作用于单位体积流体上的体积力；
- 2) 焦耳加热效应，定义为电流在导电液体中流过时，单位体积内释放出的热量。

### 3. 数学模型

为简化问题分析，只考虑磁流体动力学效应中的洛伦兹力和焦耳热在宏观上对磁流体流动的作用规律，等截面分段法拉第磁流体通道坐标系如图 1 所示，假设流动为定常、无粘、绝热，磁场强度和电导率恒定，忽略霍尔效应，建立的一维理想分段法拉第型磁流体通道的基本方程式为：

动量方程：

$$\rho u \frac{du}{dx} + \frac{dp}{dx} = jB \tag{1}$$

能量方程：

$$\rho u \frac{d(C_p T + u^2/2)}{dx} = jE \tag{2}$$

其中电流密度  $j = (k-1)\sigma uB$ ，电场强度  $E = kuB$ ，式(1)右侧为单位体积洛伦兹力  $F = jB = (k-1)\sigma uB^2$ ，式(2)右侧为通道注入或提取出电能的功率密度  $q = jE = k(k-1)\sigma u^2 B^2$ ， $q > 0$  表示通道处于电能注入状态， $q < 0$  表示通道处于电能输出状态。

状态方程：

$$p = \rho RT \tag{3}$$

连续方程：

$$\rho u A = \text{const} \tag{4}$$

引入马赫数定义式：

$$Ma = \frac{u}{\sqrt{\gamma RT}} \tag{5}$$

引入反映洛伦兹力与流体惯性力相对大小的无量纲量磁作用数[9]:

$$S_v = \frac{\sigma B^2 L}{\rho u} \quad (6)$$

动量方程可整理为:

$$\frac{1}{\gamma Ma} \frac{dp}{p} + \frac{du}{u} = (k-1) S_v \frac{dx}{L} \quad (7)$$

能量方程可整理为:

$$\frac{1}{(\gamma-1) Ma^2} \frac{dT}{T} + \frac{du}{u} = k(k-1) S_v \frac{dx}{L} \quad (8)$$

另外分别对马赫数定义式、总温与静温、总压与静压关系式进行微分并整理可得到如下各式:

$$\frac{du}{u} - \frac{dMa}{Ma} - \frac{1}{2} \frac{dT}{T} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{dT}{T} + (\gamma-1) Ma^2 \frac{du}{u} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2\right) \frac{dT^*}{T^*} \quad (10)$$

$$\frac{dp^*}{p^*} - \frac{dp}{p} - \frac{2\gamma Ma^2}{2 + (\gamma-1) Ma^2} \frac{dMa}{Ma} = 0 \quad (11)$$

通道在电能输入模式下, 若保持外界施加的法拉第电场强度不变, 根据  $E = kuB = \text{const}$ , 有:

$$\frac{du}{u} + \frac{dk}{k} = 0 \quad (12)$$

上述各式中,  $B$  为磁感应强度,  $A$  为通道截面积,  $u$  为气流速度,  $p$  为静压,  $p^*$  为总压,  $T$  为静温,  $T^*$  为总温,  $\rho$  为气体密度,  $C_p$  为气体定压比热,  $\gamma$  为气体绝热指数,  $\sigma$  为电导率,  $k$  为负载系数,  $L$  为磁流体通道的特征长度。

等截面通道中的电导率  $\sigma$  和磁感应强度  $B$  不变时, 磁作用数  $S_v$  也保持不变。

负载系数  $k$  沿通道不变时, 对式(3)、(4)及式(7)~(11)联立求解可得到如下微分方程式:

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{Ma^2 (k-1)(k\gamma - \gamma - k)}{Ma^2 - 1} S_v \frac{dx}{L} \quad (13)$$

$$\frac{du}{u} = -\frac{Ma^2 (k-1)(k\gamma - \gamma - k)}{Ma^2 - 1} S_v \frac{dx}{L} \quad (14)$$

$$\frac{dp}{p} = \frac{Ma^2 \gamma (k-1) [Ma^2 (k-1)(\gamma-1) - 1]}{Ma^2 - 1} S_v \frac{dx}{L} \quad (15)$$

$$\frac{dT}{T} = \frac{Ma^2 (k-1)(\gamma-1)(Ma^2 k\gamma - Ma^2 \gamma - k)}{Ma^2 - 1} S_v \frac{dx}{L} \quad (16)$$

$$\frac{dMa}{Ma} = \frac{-Ma^2 (k-1) [k\gamma - 2\gamma - k + Ma^2 \gamma (k-1)(\gamma-1)]}{2(Ma^2 - 1)} S_v \frac{dx}{L} \quad (17)$$

$$\frac{dp^*}{p^*} = \frac{Ma^2 \gamma (k-1) [Ma^2 (k-1)(\gamma-1) - 2]}{Ma^2 - Ma^2 \gamma - 2} S_v \frac{dx}{L} \quad (18)$$

$$\frac{dT^*}{T^*} = \frac{2Ma^2 k(k-1)(\gamma-1)}{2 + (\gamma-1)Ma^2} S_v \frac{dx}{L} \quad (19)$$

若保持法拉第电场强度  $E$  不变, 负载系数  $k$  就会沿通道变化:

$$\frac{dk}{k} = -\frac{Ma^2(k-1)(k\gamma - \gamma - k)}{Ma^2 - 1} S_v \frac{dx}{L} \quad (20)$$

由式(13)~(20)可以看出磁流体流动各参数的相对变化梯度只依赖于当地马赫数、负载系数、气体绝热指数、磁作用数等参数。通过数值方法求解上述微分方程即可得到各参数沿通道的变化情况。

## 4. 特性分析

### 4.1. 通道运行模式分析

由洛伦兹力  $F = (k-1)\sigma u B_z^2$  和通道输入或输出功率密度  $q = k(k-1)\sigma u^2 B_z^2$  可以看到, 当负载系数  $0 < k < 1$  时, 磁流体通道处于电能输出(发电)状态, 洛伦兹力方向与流体速度方向相反, 对于电阻负载电路, 负载系数是负载阻值与回路总阻值的比。此时通道将洛伦兹力对气流的制动功率转化为输出的电功率和耗散在通道内的焦耳热功率, 负载系数  $k$  表示通道输出的电功率与洛伦兹力制动的总功率的比值,  $k$  值越大, 磁流体发电的电效率越高, 而局部提取的功率密度在  $k = 0.5$  时取得最大值。

当  $k > 1$  时, 磁流体通道处于电能输入状态, 洛伦兹力方向与流体速度方向相同, 通道将输入的电能转化为洛伦兹力功和焦耳热两个部分, 气流总温升高, 负载系数  $k$  值的大小代表通道输入的总功率与洛伦兹力功率比值, 负载系数的倒数即为磁流体通道的电效率[10]。在其他参数一定的条件下, 输入的功率密度随着负载系数  $k$  的增大而增大, 但转化为焦耳热的比例也同时增加, 电效率下降。

当  $k = 1$  时, 磁流体通道法拉第电场与感应电场平衡, 通道没有电流通过, 无洛伦兹力的作用; 当  $k = 0$  时, 通道电极处于短接状态, 洛伦兹力制动功率全部转化为焦耳热耗散在通道内。当  $k < 0$  时, 磁流体通道处于电能输入状态, 洛伦兹力方向与流体速度方向相反, 此状态下文不做进一步讨论。

同时由(13)~(20)可以看到磁作用数对磁流体通道参数影响成线性关系, 磁作用数越大, 磁流体动力效应越显著, 通过提高磁作用数可以相应缩短磁流体通道尺寸。Kuranov 和 Sheikin 等人[9]的研究指出, 为了显著提高磁流体能量旁路超燃冲压发动机的性能, 必须保证磁作用数不小于 0.1。本文数值计算中取磁作用数  $S_v = 0.1$ , 气体绝热指数  $\gamma = 1.4$ 。

### 4.2. 通道特性分析

#### 4.2.1. 电能输出模式特性

在  $0 < k < 1$ , 磁流体通道电能输出模式下, 只要沿通道内阻和负载阻值保持不变, 负载系数保持不变。图 2 表示磁流体发电通道的马赫数变化规律, 可以看到在发电模式下, 亚音速和超音速气流马赫数均向声速趋近, 在通道足够长的情况下, 最终会达到当地声速, 产生热阻塞。负载系数越小, 马赫数向声速靠近越快。

在负载系数恒定条件下, 通过对式(17)进行积分运算可以得到通道中马赫数变化与通道距离的关系, 假设流动马赫数由  $Ma_0$  变化为  $Ma$  时, 坐标由  $x_0$  变为  $x$ , 并定义  $b$  为如下关系式,

$$b = \frac{2\gamma + k - k\gamma}{\gamma(k-1)(\gamma-1)} \quad (21)$$

这样在指定进口条件下, 即可得到出口马赫数  $Ma$  与坐标位置  $x$  的关系如下:

$$\frac{S_v(x-x_0)}{L} = \frac{b\gamma+1}{b(\gamma+1)(k-1)\gamma} \ln \left[ \left( \frac{Ma^2(b-Ma_0^2)}{Ma_0^2(b-Ma^2)} \right)^{\frac{b-1}{b}} \frac{\exp(Ma^{-2})}{\exp(Ma_0^{-2})} \right] \quad (22)$$

由式(21)、(22)可以得到马赫数达到 1 时的通道轴向位置。

图 3 表示磁流体发电通道中速度变化规律，此时超声速气流沿通道速度降低，但亚声速气流速度沿通道速度反而升高，且负载系数越小，速度变化越快。由于气流最终会达到声速发生阻塞，所以速度最终也只能增加或减小到某一个数值，图 3 中，初始马赫数为 2 的超声速气流，速度最大可以降低约 40%。

图 4 为磁流体发电通道总温的变化，可以看出在超声速条件下，磁流体发电通道功率提取的比例更

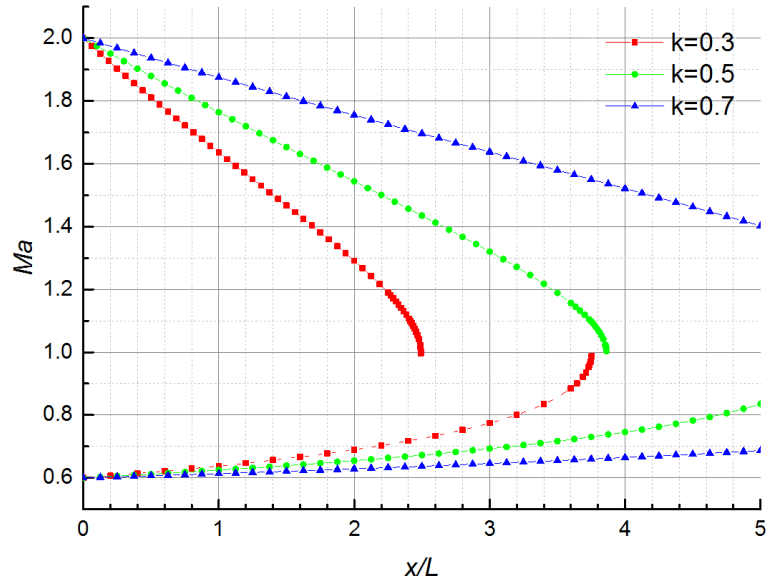


Figure 2. Distribution of  $Ma$  for  $0 < k < 1$   
图 2.  $0 < k < 1$  时  $Ma$  沿通道的变化

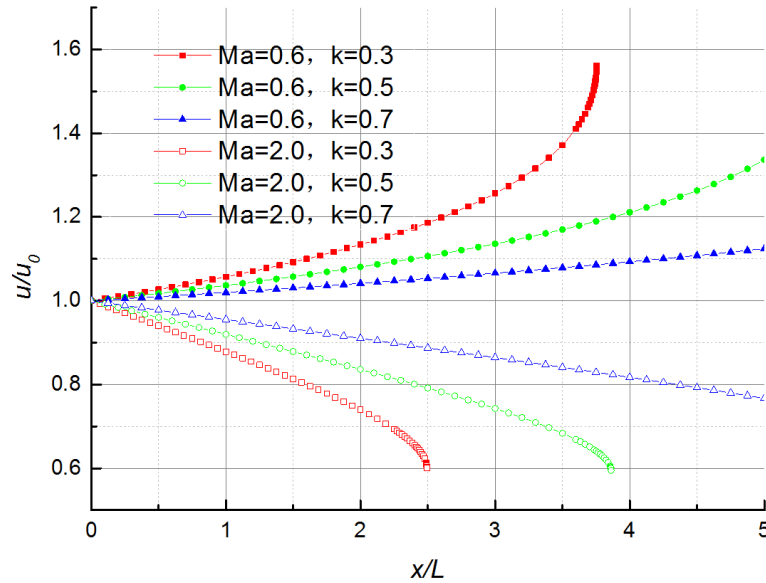


Figure 3. Distribution of  $u$  for  $0 < k < 1$   
图 3.  $0 < k < 1$  时  $u$  沿通道的变化

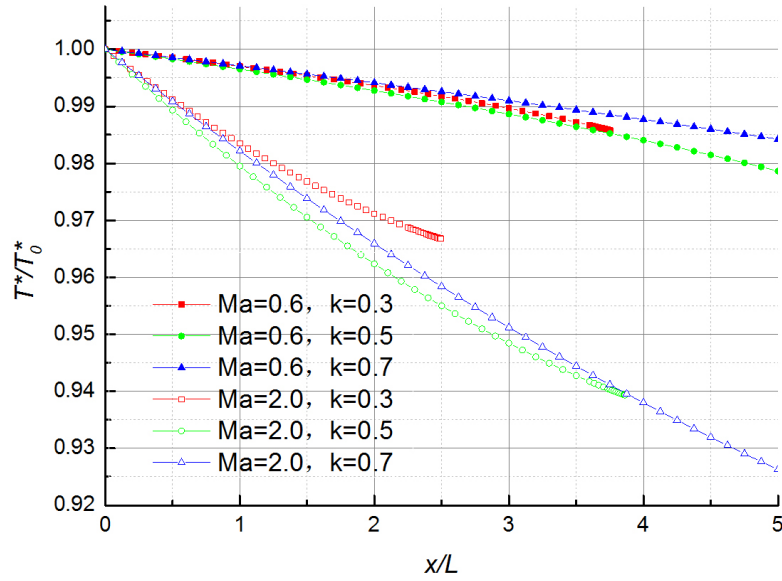


Figure 4. Distribution of  $T^*$   $0 < k < 1$   
图 4.  $0 < k < 1$  时  $T^*$  沿通道的变化

大，同时在超声速条件下，虽然  $k = 0.5$  时通道局部功率提取最大，但是其相对于  $k = 0.7$ ，沿通道马赫数降低速度更快，功率提取降低的也更快，并且提前达到阻塞位置，无法进一步进行功率提取。所以在进行超声速磁流体功率提取时，应根据通道长度和马赫数变化规律合理选择负载系数，避免通道发生热阻塞，提高通道整体功率提取率。

#### 4.2.2. 电能输入模式特性

对式(17)进行符号分析可知，当  $k > 1$  时，存在一个临界负载系数  $k_{cr}$ ：

$$k_{cr} = \frac{\gamma^2 Ma^2 - \gamma Ma^2 + 2\gamma}{\gamma^2 Ma^2 - \gamma Ma^2 + \gamma - 1} \quad (23)$$

对于超声速气流  $k_{cr} < \gamma/(\gamma-1)$ ，当  $k < k_{cr}$  时，马赫数增大， $k > k_{cr}$  时，马赫数减小。对于亚声速气流  $k_{cr} > \gamma/(\gamma-1)$ ，马赫数的变化与超声速情况相反。

下面以初始马赫数  $Ma_0 = 2$  的超声速流动为例进行说明，图 5 为  $k > 1$  且保持负载系数沿通道不变时，马赫数沿通道的变化情况。当  $1 < k < \gamma/(\gamma-1)$  时，对应图中  $k = 1.5$ 、 $k = 2.25$  和  $k = 3$  的情况，马赫数最

终将趋于  $Ma = \sqrt{\frac{2\gamma + k - k\gamma}{\gamma(k-1)(\gamma-1)}}$ ； $k > \gamma/(\gamma-1)$  时，对应图中  $k = 3.6$  的情况，马赫数趋向声速，最终达到声速发生热阻塞。

对式(14)进行符号分析可知，对于超声速气流，当负载系数  $1 < k < \gamma/(\gamma-1)$  时，处于加速状态，在  $k = (2\gamma-1)/(2\gamma-2)$  时局部加速效果达到最优，当  $k > \gamma/(\gamma-1)$  时，磁流体焦耳加热效应，超过了洛伦兹力作用效应，超声速流动将处于减速状态。当  $k = 1$  或  $k = \gamma/(\gamma-1)$  时，磁流体流动速度保持恒定，这是因为在  $k = 1$  时，通道中没有电流通过，不会对流体产生电磁作用，而在  $k = \gamma/(\gamma-1)$  时，洛伦兹力作用效果与焦耳加热作用效果相互平衡，所以速度保持不变。

图 6 为保持负载系数  $k$  不变时，速度沿通道的变化。对于相同的当地马赫数， $k = 1.5$  和  $k = 3$  的局部加速效果是相同的，但是如图 4 由于  $k = 1.5$  时通道马赫数高于  $k = 3$  时的通道马赫数，所以  $k = 1.5$  时磁流体通道加速能力要低于  $k = 3$  时的加速能力。虽然  $k = 2.25$  时通道局部加速效果最优，但是由于其通道

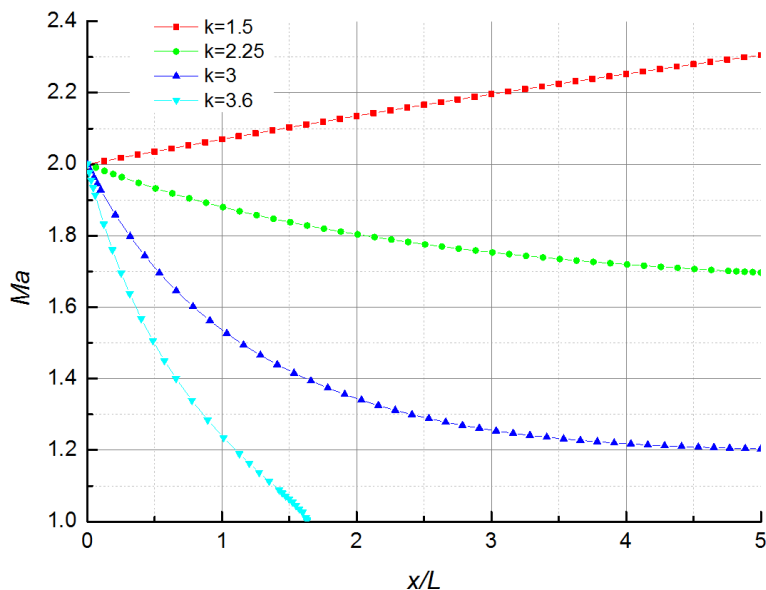


Figure 5. Distribution of  $T^*$  for unchanged  $k > 1$   
 图 5.  $k > 1$  且  $k$  保持不变时  $Ma$  沿通道的变化

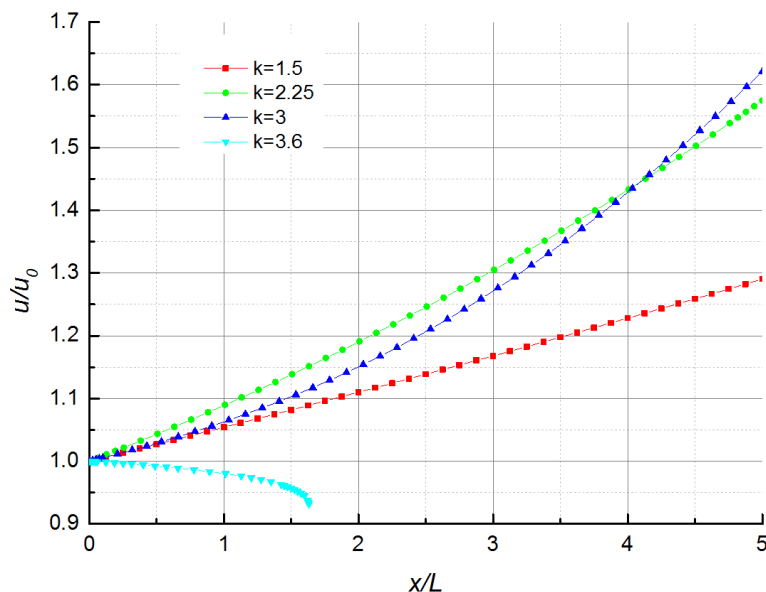


Figure 6. Distribution of  $u$  for unchanged  $k > 1$   
 图 6.  $k > 1$  且  $k$  保持不变时  $u$  沿通道的变化

马赫数高于  $k = 3$  的马赫数，在大约  $4L$  通道位置处，通道整体加速效果被  $k = 3$  的磁流体通道超过。

图 7 为超声速磁流体通道总温的变化，表示了通道消耗外界电功率的大小，可见随着负载系数的增大，沿通道消耗的电功率也急剧增加。

在磁流体通道功率输入过程中，要保持负载系数不变，需要沿通道方向，根据速度变化调整施加的外电场强度  $E$ ，实施起来不方便，而保持外电场强度  $E$  不变，通常更容易实现。图 8~10 为保持  $E$  不变，初始负载系数分别为 1.5、2.25、3 和 3.6 时通道的负载系数  $k$  速度  $u$  以及总温  $T^*$  的变化情况。在初始负载系数为 1.5、2.25 和 3 的情况下，由于沿通道速度的增加，使得负载系数减小，功率消耗相对于恒定负载系数情况有所降低。对于  $k_0 = 3.6$  情况由于负载系数沿通道的增加使通道相对于恒定负载系数情况提前发生阻塞。



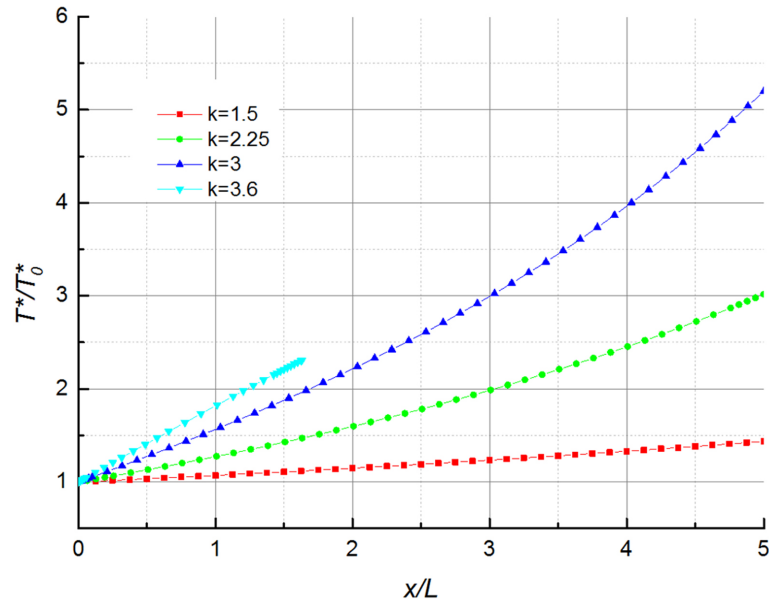


Figure 7. Distribution of  $T^*$  for unchanged  $k > 1$   
 图 7.  $k > 1$  且  $k$  保持不变时  $T^*$  沿通道的变化

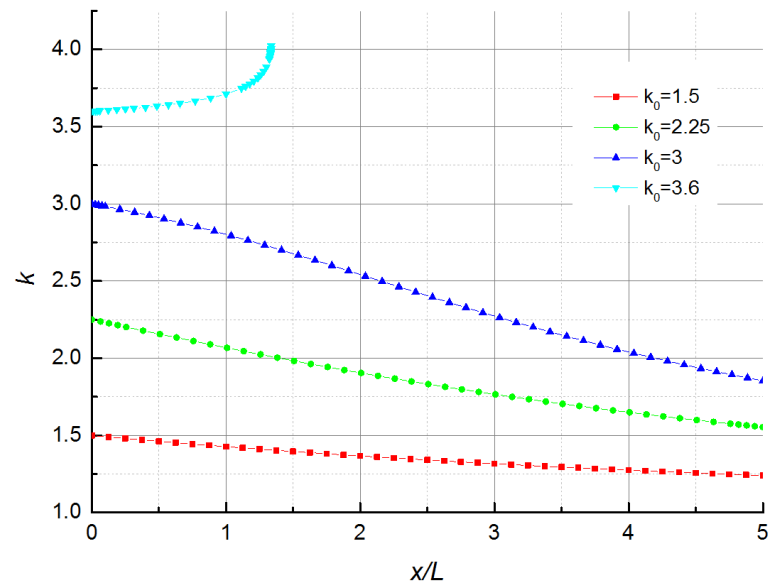


Figure 8. Distribution of  $k$  for unchanged  $E$  and  $k_0 > 1$   
 图 8.  $k_0 > 1$  且  $E$  不变时  $k$  沿通道的变化

## 5. 结论

建立了理想条件下一维法拉第型磁流体通道模型，利用得到的微分方程及数值计算结果对磁流体通道的流动特性进行分析，揭示了磁作用数、负载系数、马赫数对磁流体通道流动的影响规律。主要结论如下：

- 1) 磁作用数越大，磁流体动力效应越显著，通过提高磁作用数可以相应缩短磁流体通道尺寸。
- 2) 在磁流体通道发电模式下，流动会向声速靠近而发生热阻塞，在设计磁流体发电通道时，应当综合考虑通道尺寸、马赫数影响，合理选择负载系数，避免发生热阻塞，提高功率提取量。

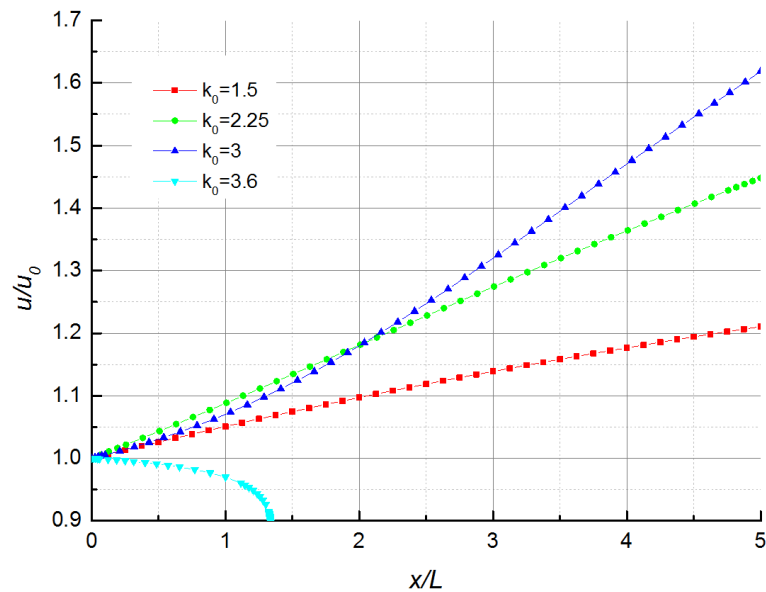


Figure 9. Distribution of  $u$  for unchanged  $E$  and  $k_0 > 1$   
 图 9.  $k_0 > 1$  且  $E$  不变  $u$  沿通道的变化

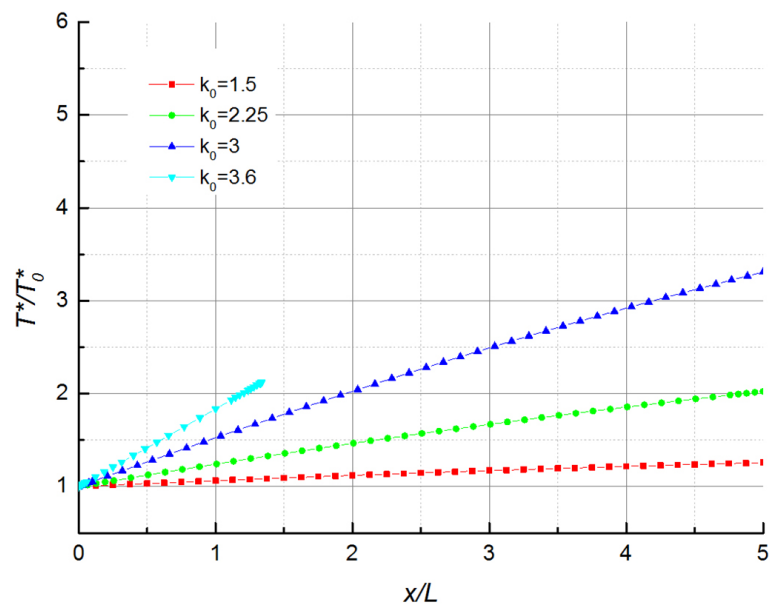


Figure 10. Distribution of  $T^*$  for unchanged  $E$  and  $k_0 > 1$   
 图 10.  $k_0 > 1$  且  $E$  不变时  $T^*$  沿通道的变化

3) 在磁流体通道功率输入模式下，负载系数  $k$  的取值决定了马赫数和速度的变化趋势。对于超声速流动，当  $1 < k < \gamma/(\gamma-1)$  时，流动处于加速状态；当  $k = (2\gamma-1)/(2\gamma-2)$  时，局部加速效果最优；当  $k = \gamma/(\gamma-1)$  时，磁流体速度保持恒定；当  $k > \gamma/(\gamma-1)$  时，流动处于减速状态，对于通道整体性能则要综合考虑尺寸、负载系数、马赫数等参数的影响。

### 参考文献 (References)

[1] Resler, E.L. and Sears, W.R. (1958) The Prospects for Magneto-Aerodynamics. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 25, 235-245.

- 
- [2] Macheret, S.O., Shneider, M.N. and Miles, R.B. (2001) Electron Beam Generated Plasmas in Hypersonic MHD Channels. *AIAA Journal*, **39**, 1127-1138. <http://dx.doi.org/10.2514/2.1426>
- [3] Macheret, S.O., Shneider, M.N. and Miles, R.B. (2002) MHD Power Extraction from Cold Hypersonic Air Flows with External Ionizers. *Journal of Propulsion and Power*, **18**, 424-431. <http://dx.doi.org/10.2514/2.5951>
- [4] Chapman, J.N., Lineberry, J.T., Schmidt, H.J., *et al.* (2004) Flightweight Magnets for Advanced Power and Propulsion Applications. AIAA, 2004-1372. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2004-1372>
- [5] Sheikin, E.G. and Kuranov, A.L. (2004) Scramjet with MHD Bypass under “Ajax” Concept. AIAA, 2004-1192. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2004-1192>
- [6] Tang, J.F., Bao, W. and Yu, D.R. (2006) The Influence of Energy-Bypass on the Performance of AJAX. AIAA, 2006-1376.
- [7] Vanka, S.P. and Ahluwalia, R.K. (1981) Three-Dimensional Flow and Thermal Development in Magnetohydrodynamic Channels. *Energy*, **6**, 218-224. <http://dx.doi.org/10.2514/3.62593>
- [8] 刘鉴民. 磁流体发电[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [9] Kuranov, A.L. and Sheikin, E.G. (2003) Magnetohydrodynamic Control on Hypersonic Aircraft under “AJAX” Concept. *Journal of Spacecraft and Rockets*, **40**, 174-182. <http://dx.doi.org/10.2514/2.3951>
- [10] David, W.B. and Unmeel, B.M. (2003) Experimental Demonstration of Magneto-Hydro-Dynamics (MHD) Acceleration. AIAA, 2003-4285.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>