# 关于核聚变毯材料的磁流体力学

1.引言

受控热核聚变的实现可能会引领下一个能源革命。然而氚燃料和氘燃料成分之间的反应要 求108 以上的温度进行，着使使用任何固体作为反应的容器是不可能的。在这些温度下燃料是电离状态的，因此可以被高电场等离子体引导—也就是说可以用强磁场做容器。在过去的几十年里不同的磁约束的概念已被实验，民用或者商用的实验聚变反应堆也已经被研究。

其中之一是在一个非常长的螺线管线性磁约束管中进行（有130米长[ 1 ]）。对于足够强的磁场，带电等离子体粒子自由地沿着磁场线螺旋运动无法逃脱。在两线性螺线管的端部的等离子体被特殊形状的线圈（称为镜）产生的强磁场所压缩。不主要平行于场线移动的颗粒在末端被反射，其他的在末端被留下禁闭。逃逸带电粒子动能的主要部分可直接转化为电能。

为了避免非常复杂的镜，这是一个简单的想法：弯曲。前面提到的几何体并连接两端。

磁力线，沿带电粒子移动，成为封闭和密闭等离子体填充圆环。约束等离子体所需的初级磁场具有环形取向。具有环形限制的最佳机器—托卡马克 是一个环形电流驱动的被环形等离子体围绕的托卡马克装置。环形电流引起的在量子态中的次级，极磁场，叠加嵌套形成环形磁表面。电场线跟那些表面的螺旋路径—他们像风一样围绕环面.托卡马克已经证明了自己的能力对于聚变约束在一些国家的实验，其中最突出的可能是联合欧洲圆环实验.

### 

(注脚: S. Molokov等人。（主编），磁流体–历史沿革及发展趋势)

### 

（JET）在英国卡勒姆，其中1991实现了第一个可控制释放的氘氚聚变并具有功率1.7兆瓦。两年后 美国实验、氚燃料聚变试验堆（TFTR）在普林斯顿产生6兆瓦和后来的10兆瓦反应堆。1997，JET能够生产更多16 MW和即将到来的国际热核实验反应—

Tor（ITER）将打败先前的所有实验--包括 能量总大小、约束时间与投资金额。

ITER 被设计主要用来进行物理实验，也将提供机会用来测试 未来高热核聚变反应工厂的一些工程构件，包括液态金属裂变毯。

毯是固体结构，位于等离子体和磁线圈之间，用以保护或保护后者可以忍受本不可忍受的辐射剂量。此外，毯 还有两个其他功能 对于快中子吸收将能量转化为热能，以及裂变氚.作为燃料成分。等离子体面对墙 称为第一壁 它将接收从聚变等离子体散发出的高热量。大量的热量输入到毯 会导致发生的体积膨胀由于强中子辐射。为了确保安全可靠运行，所有热量在毯上必须以壁温不超过临界值的速率释放。

各种工程概念已经在过去被讨论' 包括使用液态金属如 锂或锂铅合金作为可能冷却剂。原则上，液态金属是冷却剂的最佳选择。它们可以在高温下运行，它们具有较高的热导率，并且由于锂含量的冷却剂同时作为氚育种的材料。毯仅依赖液态金属的传热能力被称为自冷液态金属毯。在其他概念液体金属只服务作为裂变材料，热量由冷却液像水或氦的高压气体带走。我们将这些概念分别做 冷却液态 和 金属毯。这两种想法的结合导致了所谓的双冷却剂毯，其中强大的热量从第一墙（和从其他墙壁）通过氦除去，而体积沉积热通过液态金属流动除去。这将不可能在这里列举所有的在过去的三年中出现的各种独特想法。在下面我们将概述一些不同的毯类型的具体特点并用实例说明。

磁流体动力（MHD）中应用的核聚变问题。在过去由许多作者讨论了。在这里其中的一个重新提一下，例如，由Hunt和汉考克斯[ 2 ]的报道，lielausis [ 3 ]，Hunt和Holroyd[ 4 ]。

这些报告和引用突出了所有主要需要注意的方面—其中的液态金属磁流体在一个核聚变的环境的各项数据，到目前仍是作为评价新设计的基础。

## 2.公式化

### 紧随着Müller和Bühler[5]的教科书上出现的 专注于聚变特定方面的控制理论方程。 详细信息可在该参考文献或其中引用的原始论文中找到。

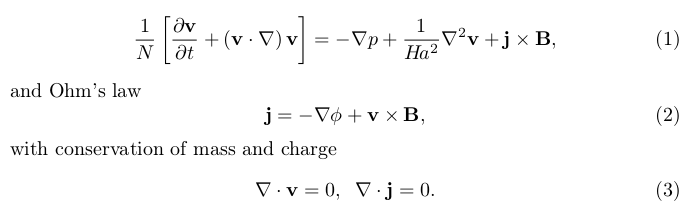
如下我们的讨论仅专注于MHD相关问题，并省略重要主题如传热，氚裂变和腐蚀。

2.1理论方程

适用于聚变毯的MHD方程在无电感限制下是完美的。 使用该假设，磁场是已知量

不依赖于流量。无量纲无感方程。对于不可压缩的粘性流体由动量平衡组成；

以及欧姆定理。初始状态的 质量和电荷。



这里， 和 代表速度，施加的磁场，电流密度，压力和电势，还有提到的初始速度



所施加的磁场的大小满足



和

管道的典型几何尺寸部分：横截面用 表示



流体性质如密度 ，磁导率 和运动粘度 假定为常数。



无感模型通常适用于低磁性雷诺数 即远小于1的情况。



具有导磁率 ， 但也可以应用雨即使对于具有较高 的情况，



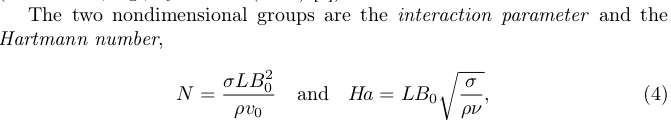
其中



反映流体中的无量纲电流密度的h数量量级

（如Walker（1986）[6]所概述的）。

两个无量纲组是相互作用参数之间存在哈特曼数，公式如下:



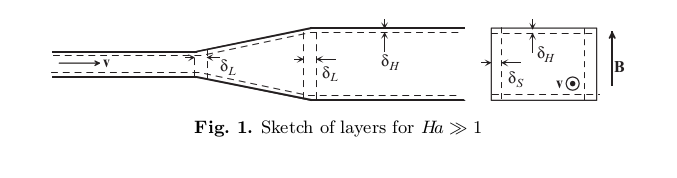
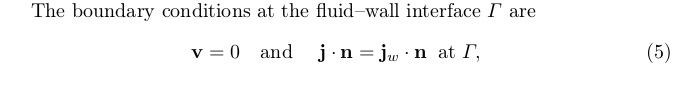
其表征比分别是（电磁/惯性力）和（电 -

磁/粘性力）的开平方。

流体动力学雷诺数按这些组给出 为：



流体壁界面 的边界条件为：

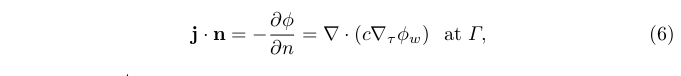


其中n是与壁垂直的向内单位， 是电流密度在墙里的电流密度。

对于电导率 的光滑壁，其厚度t小于 ，局部电流以准二维（2D）的方式被释放进薄壁。



描述这种行为电荷守恒方程在整个墙上，导致薄壁条件



是壁 电导参数， 表示尺寸，其中在流体壁界面处限定的无静电壁电势和

下标 表示与壁[7]相切的分量。



离开流体的电流进入墙，在墙上转成切线方向，并在墙上创造一个墙电位分布。 对于聚变毯中的应用，金属通常被 的流体完全润湿。



然而，为了使压降最小，一些设计概念提出了

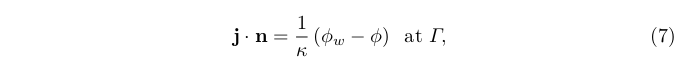


使用厚度为 电阻率 的薄绝缘涂层，涂在其中在流体和墙之间。



据Bühler和Molokov [8]报告，壁电势

然后与流体电势相关



与无量纲接触电阻



### 2.2聚变毯中的情况

聚变毯中催化剂和/或冷却剂的主要候选者是纯的锂和共晶锂铅合金Pb-17Li。

材料在450℃的温度下表现出的属性已经在表1给出，这是典型的温度用于聚变毯的应用。为了便于比较，被认为是另一个液体反应堆或冷却剂的FLIBE（LiF-34BeF 2）在500◦C的值，，也已添加到表中。

液体金属优于后者材料 在裂变比，导热性和粘度较低因此

FLIBE从来不是一个真正的替代品。

有了这些属性，我们可以估计控制无量纲组的几何形状。

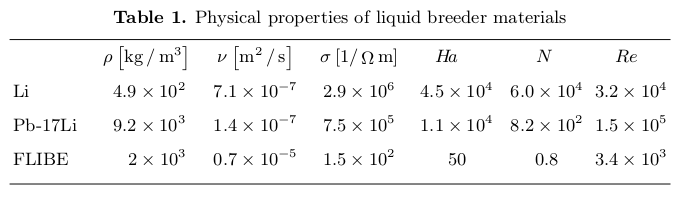


使 ， 和



我们观察到用于聚变毯中的液态金属Hartmann

数字很高 ，即，电磁力在液态金属磁流体动力学中占优势。



因此，流体以外表看不见地方式通过核心并占据了大部分的毯。

核心流之间建立了压力梯度和洛伦兹力之间的平衡。 粘性效应局限于薄层，如图1所示。 在墙上的粘性层他们具有正常磁场分量，被称为哈特曼层。



他们很薄尺度为 。



平行于场的壁是平行的层或侧层，其厚度尺度为 ： 。

其中一个可以用于这些层，Arthur Shercliff在1953年是第一个研究了

专门用于平行层绝缘矩形管道的人[9]，但还有一个人应该被记住名字，

那就是上下文中的朱利安·亨特，他在1965年论证了这种层中可能出现的高速射流，取决于  
壁的导电性[10]。

不同核心之间的层被称为Ludford层。 他们起源于墙的几何或电性质的不连续  
比如不同电导率或厚度等，并且沿着磁场线扩展着进入流体。



在粘性电磁场中这些层的厚度如Shercliff层那样缩放，即，  
条件是 [11]。



后者的条件在自冷却中几乎不能满足聚变应用。

检查表1中的相互作用参数N告诉我们惯性力与电磁力相比相当小，至少在电磁力核心。 然而，惯性可能对重合金如Pb-17Li或纯Pb，优先在Hunt's类型的侧层，其中  
喷射流中的速度可以超过平均速度数量级。



此外，惯性将实质上影响Ludford层和核心

结果它们将其厚度改变为



以惯性电磁的方式，如果 。

表1中给出的 和 的值已经被评估为a速度是典型的自冷毯。



单独冷却的速度毯子可以更小至少两个数量级，这增加 或者将 减小超过两个数量级。值如上所示。 在这种条件下，电流将平衡在Ludford层的锂毯，但流动的Pb-17Li  
在这样的层中将保持惯性。



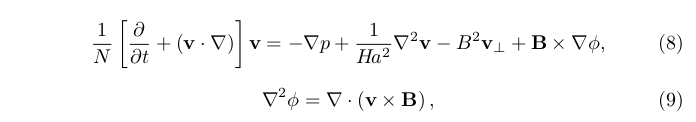
最后，应该提到 强磁性场的主要作用是核中和湍流波动中形成均匀的流动的条件，  
，如果他们被带到磁场中，会被非常衰减很快。

这导致MHD流超过甚至远远超过流体动力学湍流运动开始的阈值。

这种观察有利于分析某一方面，但降低了层流的热传递能力。

### 2.3分析

对于三维（3D）MHD流的数值分析，它通常是来自动量方程和欧姆定律



其中 表示垂直于平面的平面中的速度分量与外部施加的磁场一个方向。



第一个方程是标准的在许多商业上可获得的流体动力学公式  
其中源项 由用户建模。



第二个方程是用于额外确定作为标量电位 的扩散型方程。  
源项。



例如解决聚变应用中的MHD问题的商业软件已经被描述在  
例如DiPiazza和Ciofalo（2002）[12]或Kharicha等人的文章中  
（2004）[13]。

已经开发了一些学术代码，使用形式（8）和（9）中的MHD方程。其中，例如，  
Myasnikov和Kalyutik（1997）[14]，Sterl（1990）[15]，以及列表后面的  
至少Aitov等人（1979）[16]和舒曼（1976）[17]。

然而，直到今天，商业或学术代码都不能 使模拟压力驱动的3D MHD流量在相关参数范围内和 和 具有足够的精度。



这里的一个主要重要问题是现象发生在不同的尺度，但必须同时解决。  
例如，核心中的流量大约假使在一的长度尺度上变化，而流的基本性质在非常薄的哈特曼层中或在比较厚的平行层中就已经被确定了。

正确的分辨这些层是正确计算压降的关键，因为这些层与相邻的壁一起决定了电电流回路的电阻，限制了芯中的电流密度和压力的下降。

此外，连同 的薄壁条件（6）如图1所示，  
因此相关的聚变应用，离散化的数值问题  
线性代数方程的条件失去其对角线优势并最终成为病态条件对收敛和数值以及代码的稳定性具有严重后果。



### 2.4强磁场的逼近

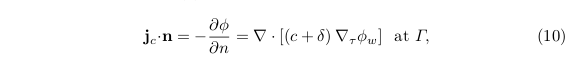


哈特曼数远大于1时， 可以考虑内核中的流作为非粘性的，并从数值中排除粘性哈特曼层 ，以此来模拟核心流。

哈特曼层的解决方案是众所周知的，从渐近的考虑（参见，例如，在1990年描述的莫罗  
哈特曼层的详细属性[18]），以便我们可以把它们以一个整体的方式进行思考。

哈特曼最重要的方面层是他们提供可能关闭的电流路径的能力。

这将修改薄壁条件（6）到  
  
代表局部无量纲厚度其中δ=（Ha | n·B |）哈特曼层。 Bühler（1995）[19]使用了这个公式。  
Walker等人已经给出了对绝缘墙有效的条件。（1971）[20]。运动学边界条件适用于无粘性代表局部无量纲的厚度其中 哈特曼层。 Bühler（1995）[19]使用了这个公式。  
Walker等人已经给出了对绝缘墙有效的条件。（1971）[20]。 运动学边界条件适用于无粘性核心现在需要 ，这是非粘性流的充分条件。 这个近似在不平行于磁场的壁处有效。

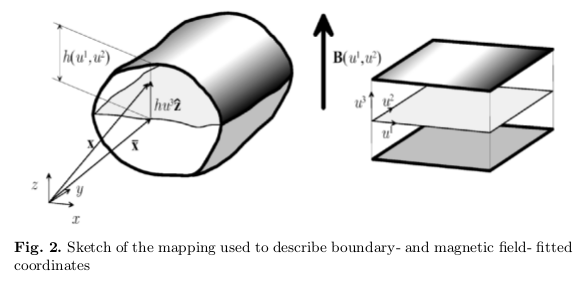
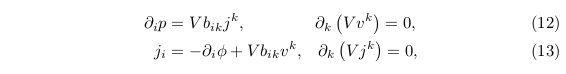


在罗伯茨层中，圆形管道的应用在磁场与壁相切的线的邻域变得不准确。  
但是，由于该区域小，对核心速度，流量的影响，在速率或降压在高哈特曼数[21,22]可忽略不计。方程（8） - （10）经常用于数值模拟 渠道流动或作为渐近分析的基础。一般建模  
已经概述了用于MHD流动的数值模拟的近壁层 Widlund（2003）[23]。

聚变毯芯的惯性力和洛伦兹力比较通常可以忽略不计， 这引导我们对库利科夫斯基的《静磁近似》1968年出版[24]。这个巧妙的方法已经启发了一些研究人员在过去对聚变毯中MHD流量进行评估，其中它有时被称为核心流近似（参见例如，[22,25,26]）。 Bühler[19]在1995年描述了Kulikovskii的实现使用具有边界拟合的张量符号进入数字代码  
坐标坐标转换



这在fig.2中示出。 映射.定义为：  
以坐标x，y，z为坐标映射到 物理空间坐标 上。  
具有质量守恒的动量方程和欧姆定律如下所示



用于描述边界和磁场拟合的映射草图坐标.

其中 和 代表洛伦兹力并感应电场，反对称张量 表示与之相互作用的磁场。这些方程可以沿着场线分析地整合，根据库利科夫斯基的说法方法，其中两个集成功能，在旁边从压力 ，被取为所述壁电位 在  
 时上下壁。墙壁电位由  
薄壁条件（10）的形式



一旦得到了2D压力和壁电位，这是直接的通过分析关系评估MHD流的所有3D属性。  
数字代码基于方程式（12） - （14）可以应用于计算MHD流过几乎任意的几何形状，对于空间变化的磁场，导管和绝缘壁，具有接触电阻的壁，并且它执行最适合高哈特曼数。

### 3自冷却的液体金属毯

在下文中，概述了一些液态金属毯，  
在过去几十年的液态金属流动简要讨论研究和引起了广泛关注的关键问题  
。让我们开始介绍，自冷却的毯。 使用与氚裂变和冷却剂相同的液体  
大大简化了设计和材料的考虑。 有重要的  
与聚变反应中毯中的液态金属的使用相关的约束：

例如，冷却剂和结构材料之间的相容性  
限制了允许的冷却液墙面温度以及锂与空气和水会发生化学反应也是设计中要重点注意的危害[27]。

3.1 极性毯

简单的自冷液体金属毯之一是设计用于在MARS [1]中概述的串联反应堆TMR中心部分。

这个毯子，如图3所示。 由等离子体周围弯曲的两排交错的圆形管组成。 在管道的后面，在所谓的束区域中有一些或多或少的直角形管道。

流体进入导管和管道穿过顶部的 连通器管，流超过毯子的部分将会进入 在底部的收集器中

对于哈特曼数大于 和 reynolds数

因此，这是一个值得信赖的毯子，即便是多层流流过毯子。

热量的转移 交给了随后的导管

墙的决定因素是温度 在 他会比哈曼层更好

速率的侧面对于 满的开发流在 引导圆形管

压力梯度评估则是根据 这个公式

如果我们 回归空间/尺寸/维度/数目 （被\*号标记的） 我们会发现/维度/压力梯度：如下公式

变得独立于c的流体导电性 此外，压降和因此毯中的最大压力都是线性关系

墙壁的厚度， 在墙的压力结果下 这去取决与 L 但是 只取决与 墙的传导率 速度 还有磁场强度

这也是为什么 不可能允许更厚的墙 去压住巨型毯的原因

值得注意的是 mhd 压力下降 在磁场强度为 4.7t 超过了 水动力压的下降 将近4个数量级

在MARS研究中，通过经验相关性考虑了由v×B在流向上的梯度引起的“环路循环”效应，导致额外的压降。

整个橡皮布的压降为Δp\* = 1.57 MPa。

如果我们用同样的想法在tokamak装置 我们会得到极限毯

一个简单的纯粹的极限流设计 如图4：

对于0.5MW / m 2的表面热通量，需要5MW / m 2的中子壁负荷和高达7.5T的磁场，压降为2.6MPa，以在混合升高 150°C的平均温度

当散热速度提高到可以将第一壁温度降低到可接受的水平时，压降变得非常高。 参考

et al。 [29]

结果表明，保持第一壁温度在一个可接受的水平所需的平均速度太高，无论是从热效率的角度来看（过低的平均温度）或从MHD压力降的角度来看（壁应力和泵送功率）。

因此，由于传热性能相对较差，用于具有导电壁的聚变毯的极向流概念并不吸引人。

在极端通道的墙壁上使用电绝缘涂层可以将压降降低到低于1MPa，如Kirillov等人所述。 （2000）[30]。

使用由俄罗斯聚变队优先推动的极向流的压力降低的方法（例如[31]）是使用沿场线具有大尺寸L的所谓狭槽通道。

检验方程 （16）表明增加L减小压降。 另一方面，如果L增加太多，则固体结构失去其机械强度，使得使用锚链的设计变得必要。

图1所示的螺旋流概念。 4

有意通过机械搅拌来帮助降低界面温度。

在较高压降的代价下获得搅拌[32]，只有详细的分析可以显示与这个想法相关的积极方面是否胜出。

首先估计，3.5MPa的压降导致环箍应力等于壁材料的极限值[29]。

另一种称为MHD流量定制的方法依靠热传递改善，通过利用强磁场中MHD流的显着特征，在极向导管中形成理想的速度分布。

这可以降低毛毯的复杂性和成本，并提高热液压性能（见

例如[33]）。

流动裁剪的一种特殊形式，涉及具有交替膨胀和收缩的管道，适用于第一壁冷却剂管道的设计。

由于连续收缩和膨胀，沿着侧壁周期性地产生强喷气，其中一个墙壁构成了毯子中的第一个墙壁。

喷气机应该从第一个墙壁上取出热量，并定期与较冷的流体混合。

通过这种方法，应该可以以一些额外的压降为代价将第一壁局部的速度提高到3倍。

也可以通过不稳定或湍流侧层来实现矩形极向导管的传热改善。

Reed和Picologlou（1989）[34]已经通过实验表明，高速侧层在2600和5,100之间的关键雷诺数下变得不稳定。

Burr等人已经获得了类似的结果。 （2000）[35]另外测量了传热的改善。

在足够强的磁场下，在侧壁产生的强剪切力产生的不稳定效应与焦耳耗散的阻尼效应相竞争，并产生湍流侧层。

由于电磁力的强非线性特征，湍流结构的特征在于大尺度的准2D涡旋，其轴线在磁场方向上对齐。

在后一参考文献中令人惊讶的结果是，即使侧层变得不稳定或紊流，在所研究的整个参数范围内，压降仍然遵循层流定律。

Ting等发表的线性稳定性理论实验观察到的临界雷诺数与理论预测之间的差异。 （1991）[36]，仍然是一个悬而未决的问题。

在欧洲发电厂概念研究[37]中研究的最先进的极地毯的设计是自制的铅锂覆层（SCLL），源自早期的设计叫做TAURO [38]。

SCLL是基于先进的等离子体物理假设和大型技术外推的融合电力反应堆与当今的知识相比较。

该设计基于ARIES-AT研究中提出的同轴流动原理[39]。 容器部件基于使用陶瓷纤维强化的SiC f / SiC复合结构，并使用高温Pb-17Li（温度高于1000℃）作为冷却剂和育种者。

SiC是低活化壁材料的优秀候选者。

几乎是一个电绝缘体，它产生高电阻，减少电流和相关的压降。

在SCLL毯中完全发达的极向流的压降似乎不是设计的一个问题。

然而，在毛毯末端或供应管线上的3D效应对流动阻力提供了额外的贡献，并且将来应该进行调查。

最后在这里提到Malang等人1993年提出的所谓的双冷却水毯是适当的。 [40]。

5异乎寻常的毯子

上面所示的毯子类型（除了基于陶瓷墙壁的SCLL）依赖于可用的材料和已知的制造技术，使得它们的实现似乎是可行的。

在美国高级功率提取（APEX）研究中，研究人员试图识别和探索腔室新颖的腔室技术，可能是革命性的概念。 在该研究中调查的两个风险概念如图1所示。 9。

第一个是由高温耐火合金制成的锂和蒸气萃取（EVOLVE）的蒸发产物。

它是基于蒸发冷却的第一壁，其具有类似于热管的锂的蒸发。 毯子的后部由液体锂填充的托盘组成，通过在1,200-1,400℃的池沸腾，通过蒸发锂来除去热量。通过大管道从橡皮布中除去蒸气。

计算表明，用Li的蒸发系统可以除去伴随的中子壁负载> 10 MW / m 2的第一壁面热通量> 2MW / m 2 [59]。

这个概念的关键MHD问题是MHD通过第一个壁上的多孔结构流动，MHD池沸腾，洛伦兹力抑制提高气泡的运动，从而降低热量转让。

图中所示的另一概念是具有厚液体的第一壁毯子。 液体墙壁概念将固体第一壁设置在一边，并依赖于围绕着等离子体的快速移动的自由表面流来提供传热能力，等离子体沿着弯曲的后壁向下移动时通过离心力被压向壁。

还讨论了使用洛伦兹力将液体附着在墙壁上的概念。 该设计在概念上是简单的，并提供可再生的第一液体壁，以避免以固定的间隔替代固体结构。

对于具有环形磁场的闭合环面中的理想膜流，不存在垂直于场的Hartmann壁。 因此，目前的封闭被排除在外，MHD对这种流动的抵抗力应该很低。 另一方面，任何聚变反应堆必须穿过橡皮布进行等离子体诊断和加热，再次引入Hartmann墙壁和相关的Hartmann制动。

此外，流动沿着沿流动方向变化的磁场发生。 这引起轴向电位差，其驱动轴向电流，这取决于它们的取向可产生可能从膜分离膜的洛伦兹力。

对所有类型的自由表面MHD流量进行完整的评估，特别是那些

相关的聚变应用，直到1999年由莫洛科夫和里德[60h]

（对于特定应用，参见[61]）。

通过蒸发Li的等离子体除了会污染除了自由表面稳定性和与等离子体的相互作用外，这是一个可以讨论的问题。

从抽空的等离子体室中提取液态金属可能是另一个禁止设计的问题。

6.结论

在过去几十年中考虑的聚变毯中液态金属MHD流动

涵盖了压力驱动管道流动的一些现象，不同方向的弯曲，电流耦合，

流动在覆盖有绝缘涂层的管道中，浮力对流，自由表面流动，甚至蒸发和沸腾。

到目前为止，聚变MHD流没有什么特别之处，除了磁场远远高于任何其他已知的工程应用中。

在单个管道中的3D流中发生的所有现象似乎都被很好地理解，并且通常可以以足够的精度预测设计聚变反应堆毛毯的工程组件。

渐近理论是预测MHD的首选方法

流量用于聚变应用，但随着计算资源的不断进步，数字解决方案可能在几年内达到所需的参数范围。

如果是这样，渐近解决方案仍将作为代码验证的工具，并且将继续提供有关所涉及的物理现象的观察。 学术计算工具将有助于在商业流体动力学评估尚未应用到此领域的成果代码。 原则上，许多商业代码允许用户实现诸如洛伦兹力或电势（如果尚未存在）的数据。 然而，经验表明，用户完全依赖于软件公司的政策。

代码版本中的任何更改都可能需要严格更新自己开发的用户子程序，并且这样做的努力可能会大大地推进进行的研究。

此外，给定类型的边界条件并不总是适用于MHD流的有效计算。 另一方面，学术与开发和处理这些工具的人员密切相关。

为了设计具有上述复杂性的聚变毯，仅仅准确地预测单个组件中的MHD流是不够的。 由于Madarame，我们知道全球影响，直到整个系统被考虑才会出现，可能会使整体表现恶化。 因此，需要额外的工程方法，考虑到全球复杂3D系统中的流量耦合，即使以某些流程细节为代价。

在相关聚变MHD研究中取得的一切进展都得到了实验的支持，实验证实了理论解决方案的有效性，或者在理论预测尚不存在的情况下产生结果。

在核环境中操作ITER和液态金属毯子的巨大成本将使得MHD实验和组件的预测试是必要的，以便最小化开发过程中的潜在风险。未来的聚变毯子的MHD研究可能必须集中在一个特定的 关于建模和实验的参考方面。

然而，研究活动的某一部分应该专注于MHD流程的基本方面，而不仅限于具体的设计。 这可能是必要的，以吸引和保持合格的科学家在这个具有挑战性的领域。

此外，在过去三十年中，我们看到一些不同的毯子概念在现场出现和消失，在这次审查论文中，只有最突出的概念才出现。

所有这些对未来应用的调查仍然存在着根本的研究成果，而不是概念具体的细节。