

文章编号: 1001-4888(2023)01-0037-10

金属流体速度的阵列探针测量方法研究^{*}

张祥飞¹, 阳倦成², 吕泽¹, 张年梅¹

(1. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 101408;

2. 西安交通大学 航天航空学院机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西西安 710049)

摘要: 不透明液态金属的速度测量在电磁冶金和核能领域具有十分重要的作用, 能为相关现象的解释提供直接的数据支持。以电磁学中的欧姆定律为基础, 搭建了一套多探针阵列的金属流体速度测量系统。通过设计探针的排布形式、数据采集系统和数据处理方法, 以磁场环境下圆柱绕流问题为实验对象, 实验验证了探针插入和排布方式对测量结果的影响, 结果表明探针插入流体与探针紧贴壁面所测量得到的速度误差约为 5%, 而探针排布方式引起的测量误差为 2.5%~10%。另外, 实验中还发现阵列探针伸入到流体中不影响其对金属流体非定常波动频率的测量, 流场的波动频率也不会受到周围探针的影响。

关键词: 金属流体; 电势探针; 磁流体动力学; 磁场; 流场测量

中图分类号: O361.3

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-22-072

0 引言

在磁约束聚变领域, 包层结构主要承担能量转换、氦增值辐射屏蔽等功能。因为液态包层具有结构简单安全、效率高、核燃料易于提取、TBR (Tritium Breeding Rate, 氦增值比) 高等优点, 所以在磁约束聚变装置中使用液态包层被认为是一种可行的方案^[1]。然而, 在开展液态包层设计的前期需要大量的液态金属磁流体力学实验数据作为参考, 因此发展相关的液态金属测量技术刻不容缓。另外, 在金属冶炼过程中, 通过对钢液凝固过程中的流场控制, 能极大提升材料成形后的性能, 关于如何获得钢液内部的流动速度分布也是冶金领域的一个重要研究方向^[2]。因为金属流体具有不透明、强腐蚀、强氧化性、高电导率等特性, 传统的光学测量方法^[3-5]难以适用, 所以有必要开展新型流场测量方法的研究, 以实现金属流体的流场测量。

关于金属流体的速度测量, Eckert 等^[6]归纳了几种可行的测量方法, 其中的射线测量方法^[7,8]和洛伦兹力测速方法^[9,10], 虽然具有测量装置不与金属流体接触, 流体流动不受干扰的优点, 但是, 受制于射线在流体中快速衰减和洛伦兹力测速计中的永磁体尺寸较小的问题, 这两种方法的测量区域都很小。UDV (Ultrasonic Doppler Velocimetry, 脉冲超声波多普勒测速) 方法^[11-14]属于间接接触的测量方法, 通过超声波探头向流体中发送超声信号, 根据发送信号和接收信号之间的多普勒频移计算出流体微团的速度。在该方法中, 虽然探头可以只装入壁面而不侵入液体, 不影响流场分布, 但是, 根据超声信号只能得到超声波发射方向的一维流场信息, 且超声信号受周围环境噪声和磁场的影响显著。在与金属流体直接接触的测量方法中, 热线测速法^[15,16]基于加热状态下的电阻丝与流场的热交换, 通过温度变化可得出周边液体的流速; 机械光学法^[17,18]基于流体对侵入的微小探头的机械作用力, 通过特定的测量

^{*} 收稿日期: 2022-03-27; 修回日期: 2022-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(52176089, 51776194); 国家重点研发计划项目(2017YFE0301300)资助

通信作者: 张年梅(1964—), 女, 博士, 教授。主要研究领域: 磁流体动力学, 多场耦合。Email: nmzhang@ucas.ac.cn

系统和分析软件可以获得流场速度信息,这两种测量方法都具有测量装置安装复杂且容易被金属流体污染或破坏的缺点;电势探针法^[19-26]基于电磁学中的欧姆定律,通过探针与液态金属直接接触,可以准确测量恒定磁场中流体在垂直于磁场方向的平面内的电势差,由测量得到的电势差可以计算得出流场中的局部速度,虽然接触流体可能会对流场产生一定的影响,但是其具有时间分辨率高、空间分辨率高的优点,能够测得金属流体中丰富的流场信息,在金属流体的测量方面具有巨大的应用潜力。

20 世纪 40 年代,Kolin^[27]提出使用电势探针法来测量金属流体中的局部流速。在一定的参数条件下,当流场沿磁场线方向呈现准二维的流动状态时,主流区中垂直磁场线方向的 2 个速度分量可以直接通过欧姆定律与电势探针测得的电势差建立线性关系,因此,可以通过电势探针法直接测得金属流体的局部速度分布。现有研究中提到过的电势探针主要有 2 种,一种是固定在哈特曼壁(测试管道中垂直于磁场线方向的平面)上的阵列电势探针, Frank^[19] 和 Rhoads^[22] 等用这种探针研究圆柱绕流的 MHD (Magnetohydrodynamics, 磁流体动力学) 问题, Klein 和 Pothérat 等^[20,21] 用这种测量方法研究了封闭容器中电极驱动的 MHD 流动问题;还有一种是可以移动并且测量管道中任意位置处电势信号的侵入式电势探针, Kolesnikov 等^[23,25] 和 Kit 等^[26] 用这种测量方法研究了金属流体的圆柱绕流问题, Kolesnikov 和 Tsinober^[24] 用侵入式探针测量了金属流体流经栅格后的速度分布。

关于电势探针测量方法,虽然前人已经开展了相关研究,但还未对探针插入流体的深度以及阵列探针的排布方式对流动测量所带来的影响进行系统的研究。本文针对这一问题,以金属流体的圆柱绕流为研究对象,通过安装在哈特曼壁上的阵列探针,对圆柱尾迹中的局部速度和流动非定常波动频率进行了测量,验证了插入流体一定长度的电势探针对于测量结果的影响,还比较了阵列探针 3 种排布方式下测量结果的差异。

1 实验测量系统

1.1 测量原理

实验中采用电势探针方法来实现金属流体的速度测量,电势探针方法的测量原理为欧姆定律^[28]

$$\mathbf{j}/\sigma = -\nabla\varphi + \mathbf{u} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

式中: σ 为流体的电导率; φ 为流体中的局部电势; $\mathbf{j}$ 为电流密度; $\mathbf{u}$ 为速度场; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度。如果外加稳恒磁场沿 y 轴方向 $\mathbf{B}=(0, B_0, 0)$, 我们将电流密度表示为 $\mathbf{j}=(j_x, j_y, j_z)$, 速度场表示为 $\mathbf{u}=(u, v, w)$, 那么在垂直磁场方向的平面内的速度 $\mathbf{u}_p$ 可以表示为电流密度和电势的函数:

$$\mathbf{u}_p = \frac{1}{B_0} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} + j_z \right) \mathbf{e}_x + \left(-\frac{\partial \varphi}{\partial x} - j_x \right) \mathbf{e}_z \right] \quad (2)$$

式中: B_0 为磁场强度; $\mathbf{e}_x$ 和 $\mathbf{e}_z$ 为单位矢量; j_z 和 j_x 为电流密度分量。从式(2)中可以看出,流场中局部的速度取决于电势梯度和感应电流密度。如果流场的控制参数满足条件: $Ha \gg 1$ 和 $N \gg 1$, 其中 $Ha = B_0 l \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}}$; B_0 为磁场强度; l 为管道沿磁场方向的半宽; ρ 为流体密度; ν 为流体的运动黏性系数; $N = \sigma l B_0^2 / (\rho U_0)$, U_0 为流体平均速度,则流场沿磁场线方向呈现准二维的流动状态。根据 Sommeria^[29] 的分析,如果流场处于准二维或者比较弱的三维流动状态,主流区中的电流密度 $|\mathbf{j}^{core}|$ 很小,欧姆定律(式(1))可以近似为 $\nabla\varphi^{core} + (\mathbf{u}^{core} \times \mathbf{B}) = 0$, 这样近似处理的精度为 $|\mathbf{j}^{core}|/\sigma$ 。由于金属流体的电导率很高(约 10^6 S/m), 在垂直磁场的平面内的电流密度可看作 0, 即 $j_x = 0$, $j_z = 0$, 因此,式(2)中的速度分量可分别表示为

$$u(x, z) = \frac{1}{B_0} \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad w(x, z) = -\frac{1}{B_0} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (3)$$

1.2 测量系统

实验中,在每个哈特曼壁上各设计了一些区域安装壁面阵列探针,以测量金属流体中相应位置的电势信号,如图 1 所示。在 A 位置的探针分布方式是 3×20 , 在 C 和 F 位置处的排布方式是 3×10 , 以 A 位置局部测点 A1~A8 称作一个数据采集组,在该采集组中, A1~A7 为正极, A8 为公共负极,每个采

集组可以得到7个有效的电势差信号。需要指出的是,图1给出的是一侧哈特曼壁上的测点排布方式,另外一侧的哈特曼壁上存在3个与A、C、F关于 xoz 平面对称设置的测点分布区域B、D、G,因此,我们共设计了240个壁面探针测点。沿着 y 轴和 z 轴方向,相邻2个测点之间的距离保持2mm。

在实验过程中,电势测量使用的是32通道NI4309采集卡,可实现精确且可重复的纳伏(nV)级测量;驱动金属流体的是电磁泵,测试管道放置在直流电磁铁中,控制电磁泵和电磁铁的各种电子设备以及周围环境引起的噪声信号的幅值约为 $2\mu\text{V}$,实验测量工况中的有效电势信号为 $10\mu\text{V}\sim 1000\mu\text{V}$ 量级,因此,信噪比 r_{sn} 不小于20dB,噪声对于测量结果的影响可以忽略;在电势探针的设计制作过程中,游标卡尺的精度为0.01mm,对速度计算带来的误差约为0.5%;另外,在文献[25]中,圆柱绕流涡脱落频率处于1的量级,而根据奈奎斯特采样定律,采样频率至少要高于信号频率的两倍,因此结合采集卡的频率上限200Hz,为了能够得到一个非稳态周期内足够多时刻的电势信号,我们设置的采样频率为200Hz。将阵列探针测量得到的电势信号通过式(3)直接与速度建立关系,可进行进一步的流场特征分析。然而,速度的测量建立在流场沿磁场线方向为准二维流动状态的基础上,因此,我们首先需要把2个哈特曼壁上对应位置的阵列探针测得的电势差时间序列做互相关分析,以互相关系数的大小来判断流动状态是否为准二维状态。当流动为准二维状态以后,测得的电势信号可直接转化为速度信息,再通过频谱分析、统计分析等处理方法,对流场的流动特征和统计特性进行更加详细的分析讨论。数据处理过程如图2所示。

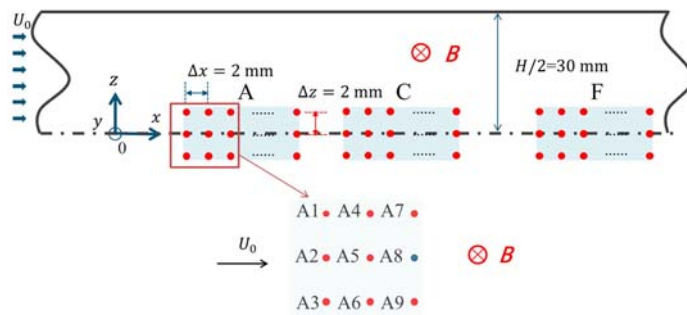


图1 阵列探针在每个哈特曼壁上的分布方式

Fig. 1 Arrangement of the wall potential probes on each Hartmann wall



图2 数据采集和分析流程

Fig. 2 Chart of data collection and analysis

嵌入到哈特曼壁上的电势探针,虽然改变了测点周围的局部电导率^[30],但是这些变化都是基于测点电极的直径的,在本实验中,每个测点电极的直径很小($d_{pr}=0.35\text{mm}$),因此,局部电导率的变化对流场的影响可以忽略。另外,在使用阵列电势探针测量金属流体的MHD流动时,虽然有的实验设计中要求测点电极刚好与壁面平齐而不进入流体内部^[19-21],但是金属流体一般容易被氧化,氧化物会附着在管道内壁的探针测点电极上进而导致金属流体与测点电极之间产生较大接触电阻,影响电势信号的有效性;还有的实验设计选择将探针伸入到金属流体中^[21],这样虽然会对流动产生一定的影响,但是可以保证实验过程中信号采集的持续性。本文实验中,为了确保能够持续地采集到有效的电势信号,设计的壁面电势探针每个测点电极都伸入到流体中一定的距离 $h=2\text{mm}$ 。根据Messadek等^[30]的说法,阵列探针伸入到流体中会对流动产生一定影响,但是缺乏系统的对比结果,因此,本文实验中首先需要比较的是伸入式探针与贴壁探针对流场测量结果的差异,其次需要验证伸入到流体中的阵列探针测量结果是否受到周围探针的影响。为了同时测量流场中的局部速度分布和流场的非定常波动频率,我们

以金属流体的圆柱绕流问题为实验测量对象。

1.3 实验装置

金属流体电势测量实验在中国科学院大学 (UCAS) 磁流体力学实验室搭建的液态金属实验回路 MaTH (Magneto-Thermo Hydrodynamic Loop) 上完成^[31-33]。液态金属回路如图 3 所示, 整个回路包含的主要部件有: 储液罐、电磁泵、换热器、流量计、标定罐、电磁铁、液位调节器等。液位调节器与测试管道内部相连, 通过连通器原理可以实现管道内部液位的调节。实验中的工作介质是一种镓铟锡合金 $\text{Ga}^{67}\text{In}^{20.5}\text{Sn}^{12.5}$, 该金属合金常温下为液态且无毒, 它的物理特性为^[34]: 密度 $\rho=6360\text{kg/m}^3$, 电导率 $\sigma=3.1\times 10^6\text{S/m}$, 运动黏性系数 $\nu=2.98\times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ 。可调节直流电磁铁的最大量程为 2T(特斯拉), 电磁铁中有效实验区域的大小为: 1200mm(长度) $\times$ 320mm(宽度) $\times$ 80mm(高度), 在该实验区域内, 磁场强度的不均匀度低于 1%。

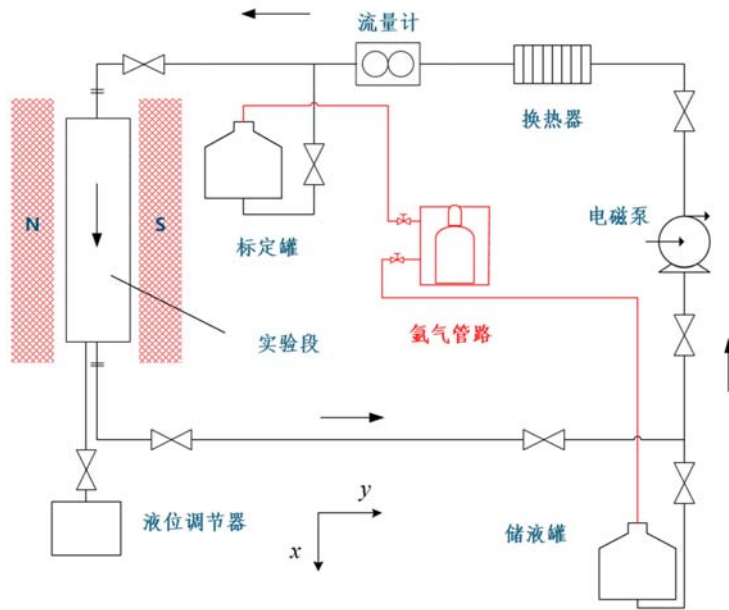


图 3 液态金属回路

Fig. 3 Liquid metal loop

圆柱绕流实验测试区域如图 4 所示, 金属流体流过的区域为 $142d\times 8.33d\times 10d$; U 为金属流体入口速度, 速度的平均值为 U_0 ; 圆柱直径 $d=6\text{mm}$; 圆柱放置在距离入口 $L_i=56d$ 的位置; 圆柱距离出口的距离为 $L_o=86d$; 管道宽度 $W=2l=8.33d$; 管道高度 $H=10d$; 外加磁场 $\mathbf{B}$ 沿着圆柱的轴线方向; A~F 为安装壁面阵列探针的位置。制作实验管道和圆柱的材料均为透明绝缘的聚甲基丙烯酸甲酯 (有机玻璃), 实验过程中通过电磁泵驱动流体流动, 流速可以在 $0\sim 35.8\text{mm/s}$ 的范围内连续稳定调节, 调节精度为 0.09mm/s , 对应的雷诺数 $Re(Re=U_0d/\nu)$ 的变化范围为 $0\sim 722$ 。稳恒磁场强度的变化范围是 $0\sim 1.8\text{T}$, 对应的最大哈特曼数 $Ha=1818$ 。

实验中使用壁面阵列电势探针测量圆柱下游尾迹流场中的速度分布, 电势探针每个测点电极的直径 $d_{pr}=0.35\text{mm}$ 。图 1 所示为每个哈特曼壁上阵列探针的分布方式, 我们共设计了 2 种排布方式, 在 A 位置的探针分布方式是 3×20 , 在 C 和 E 位置处排布方式是 3×10 , 这 3 个位置分别位于圆柱后面 $3d$ 、 $18d$ 和 $48d$ 处。考虑到靠近圆柱周围的流动会更加复杂, 设置的壁面探针距离圆柱最近的位置为 $3d$ 。根据壁面阵列探针测得电势信号, 式 (3) 中的 2 个速度分量可以表示为

$$u(x, z) = \frac{\varphi^{uill}(x, z + \Delta z) - \varphi^{uill}(x, z)}{B_0 \Delta z} \quad (4)$$

$$w(x, z) = -\frac{\varphi^{uill}(x + \Delta x, z) - \varphi^{uill}(x, z)}{B_0 \Delta x} \quad (5)$$

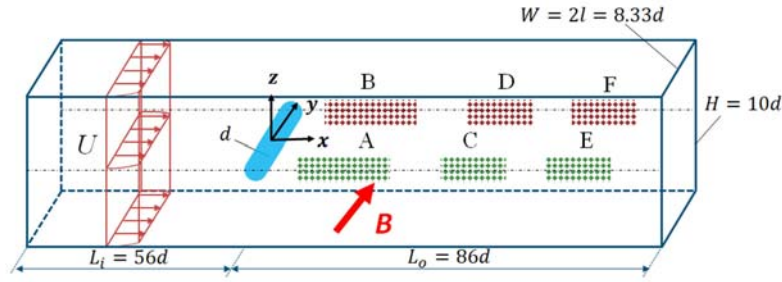


图 4 实验测试段和阵列探针安装位置

Fig. 4 Sketch of the test section and the array potential probes installation positions

式中： φ^{wall} 为壁面探针测量得到的金属流体的电势； Δx 和 Δz 为相邻两个探针之间的空间间隔，且都等于 2mm。

2 实验结果与讨论

2.1 阵列探针伸入流体对金属流体 MHD 流动测量的影响

在实验过程中，影响实验测量的主要因素有：环境噪声水平、探针加工精度、磁场强度的均匀性、流量稳定性等。为了能够准确地采集到电势信号，我们的处理如下：(1)数据采集线缆全部采用双层屏蔽的双绞线。(2)为了获得一个非稳态周期内足够多时刻的电势信号，设置的采样频率为 200Hz。(3)在加工制作过程中，严格控制相邻 2 个探针之间的间隔为 2mm，实验之前结合电磁流量计进行标定。(4)在磁铁中心 $1200\text{mm} \times 320\text{mm} \times 80\text{mm}$ 的区域内开展实验测量，此区域内的磁场强度均匀性大于 99%。(5)实验选择在电压稳定的时间段进行测量，且每次改变流量或磁场强度的情况下，等待足够长的时间再进行数据采集。通过以上的处理，本文的实验结果具有良好的重复性。选取图 1 中 A 位置的壁面电势探针 A1~A8 作为数据采集组来测量金属流体圆柱绕流尾迹中的速度分布，当 8 个测点电极伸入到金属流体中 2mm 的时候测量得出的结果与测点不进入流体 ($h=0$) 的情况进行对比，2 种阵列探针的形式如图 5 所示。实验测量过程中，金属流体的流量 Q 稳定在 $0.4\text{m}^3/\text{h}$ ，即 $Re=722$ 。因为环境噪声水平和流量稳定性对测量结果影响显著，所以我们除了在实验前后都采集环境噪声信号、实验测量选择在电压稳定的时间段进行、调换工况间隔足够长的时间再开始数据采集外，还在每个工况下都采集了 10min 的实验数据，以便在后续的数据处理过程中可以尽量消除实验操作带来的误差。

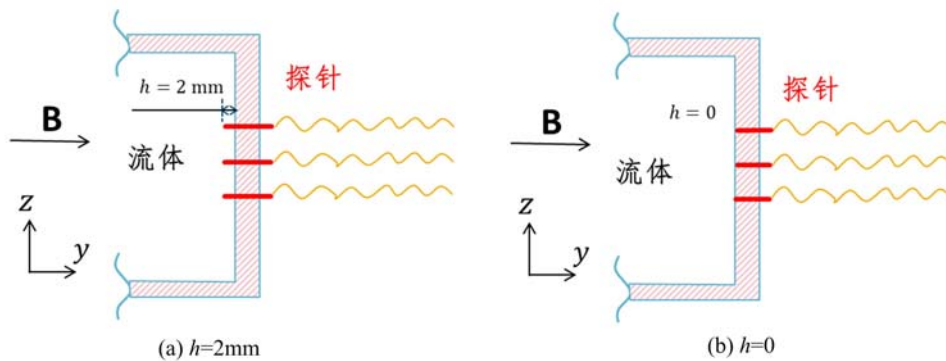


图 5 伸入到流体中的壁面探针的排列方式

Fig. 5 Arrangement of wall electric potential probes inserting inside of liquid

在速度测量方面，通过式(4)直接建立电势差与速度分量的线性关系。图 6 中给出了壁面探针 A1 和 A2 测得的水平速度分量 $u_{1-2} = \Delta\varphi / (B_0 \Delta z)$ 的相关结果随相互作用数 N 的变化曲线，其中 $(U_{mean})_{1-2}$ 表示的是由壁面探针 A1 和 A2 测得的电势信号的时间平均值 $\overline{\varphi_{A1}}$ 和 $\overline{\varphi_{A2}}$ 求得的水平速度分量，即

$$(U_{mean})_{1-2} = \frac{\overline{\varphi_{A1}} - \overline{\varphi_{A2}}}{B_0 \Delta z} \quad (6)$$

$(U_{p-p})_{1-2}$ 表示的是通过壁面探针 A1 和 A2 的电势信号的峰值 $(\varphi_{A1})_p$ 和 $(\varphi_{A2})_p$ 求得的速度分量, 即

$$(U_{p-p})_{1-2} = \frac{(\varphi_{A1})_p - (\varphi_{A2})_p}{B_0 \Delta z} \quad (7)$$

由图 6 可知, 当壁面探针伸入到流体中 2mm 时, 与不伸入到流体中的情况相比, 测量得到的速度值 $(U_{mean})_{1-2}$ 的相对误差不超过 5.23%, $(U_{p-p})_{1-2}$ 的相对误差不超过 10.49%; 当 $N \geq 3$ 时, $(U_{mean})_{1-2}$ 的最大相对误差为 4.75%, $(U_{p-p})_{1-2}$ 的最大相对误差为 8.70%。由此可见, 伸入到流体中的壁面探针对于速度测量结果有一定的影响, 但影响比较有限, 尤其是 $(U_{mean})_{1-2}$ 的相对误差约为 5%, 在可接受的范围之内。Kolesnikov 等^[25]测量了相同流量下磁场强度为 0.08T 和 0.8T 时圆柱尾迹中的速度分布, 结果表明磁场强度为 0.8T 时, 相同位置处的速度减小。在图 6 中, 随着外加磁场强度增加 (N 增大), 阵列探针测得的局部速度减小, 与文献中的测量结果具有相同的变化趋势。

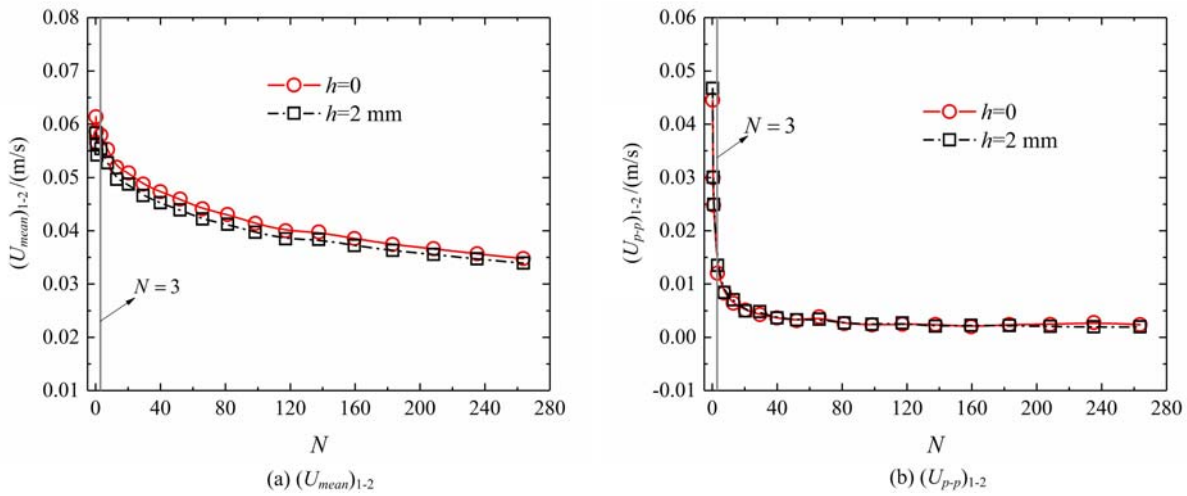


图 6 伸入到流体中不同长度的壁面探针测得的流体速度

Fig. 6 Comparison of velocities recorded by wall probes in different lengths

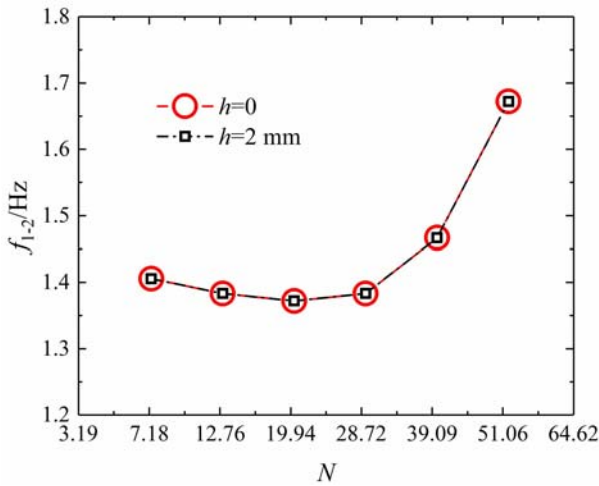


图 7 伸入到流体中不同长度的壁面探针测得的圆柱绕流尾迹涡脱落频率

Fig7 Frequency of the flow around circular cylinder at wall probes in different lengths

外, 在图 7 中还可发现, 尾迹流场中的涡脱落频率会随着磁场强度增加 (增大) 而增大, Mück 等^[35]的数值研究中也发现了这种现象。

在尾迹涡脱落频率方面, 我们将壁面探针 A1 和 A2 测得的电势差时间序列做 FFT (Fast Fourier Transformation, 快速傅里叶变换), 将 PSD (Power Spectrum Density, 能量谱密度) 图中极值点对应的频率定义为圆柱尾迹中涡脱落的主频。图 7 给出了当 $Q=0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 伸入到金属流体中一定距离的阵列探针测得的圆柱绕流尾迹中的涡脱落频率 f_{1-2} 随相互作用数 N 的变化, 并与壁面探针刚好不进入到流体中 ($h=0$) 的结果进行比较。结果证实, 在 $7.33 \leq N \leq 52.09$ ($303 \leq Ha \leq 808$) 的范围内, 电势探针插入到流体中对于尾迹流场中的涡脱落频率没有影响, 也即伸入到流体中的阵列探针不影响其对于金属流体 MHD 流动的非定常波动频率的测量。另

2.2 周围探针对金属流体 MHD 流动测量的影响

2.1 中探究了伸入到流体内部的阵列电势探针对于金属流体的局部速度和速度场非定常波动频率的影响。在本文设计的阵列电势探针的排布方式中,每个数据采集组中 8 个壁面电势探针的分布方式如图 8(c)所示,每个探针周围都分布其他的测点电极,因此,还需要探究不同排列方式的阵列探针对于金属流体速度场测量的影响。以阵列电势探针 A7~A9 为研究对象,图 8 中给出了 3 种排列方式,即分别在 A7~A9 探针前增加一列或者两列阵列探针,来研究 A7~A9 探针的测量结果是否受到周围探针的影响。实验中保持稳定的流量 $0.4\text{ m}^3/\text{h}$,改变不同的磁场强度进行实验,每个磁场强度下都采集 10min 的实验数据。

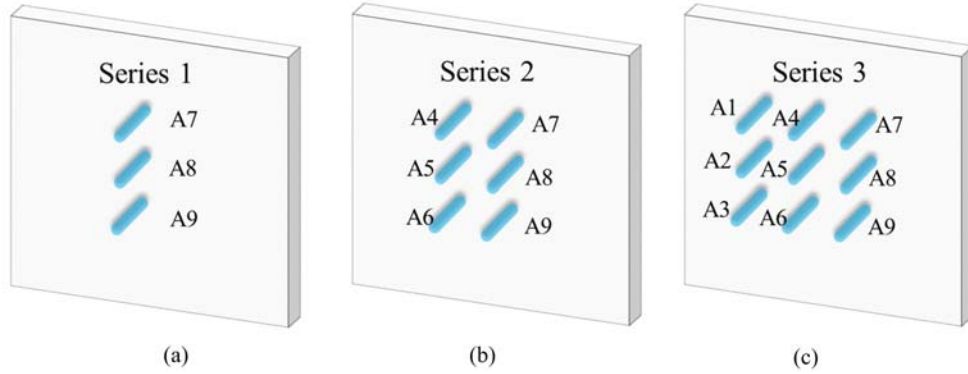


图 8 不同的阵列探针排布方式:(a)单列排布 3×1 ;(b)双列排布 3×2 ;(c)三列排布 3×3

Fig. 8 Arrangement of electric potential probes: (a) single column 3×1 ;

(b) two columns 3×2 ; (c) three columns 3×3

在速度测量方面,通过式(4)将测量的电势差信号转化为相关联的速度分量。图 9 给出了 3 种不同阵列探针排列方式下,壁面探针 A7 和 A8 测量得出的流体速度随相互作用数 N 的变化。在几种排布方式中,A7 和 A8 测量的速度 $(U_{mean})_{7-8}$ 和 $(U_{p-p})_{7-8}$ 分别通过与式(6)和式(7)相同的方法求出。由图 9 可得出,与第一种排布方式测得的 $((U_{mean})_{7-8})_1$ 和 $((U_{p-p})_{7-8})_1$ 相比,第二种排布方式测量得到的

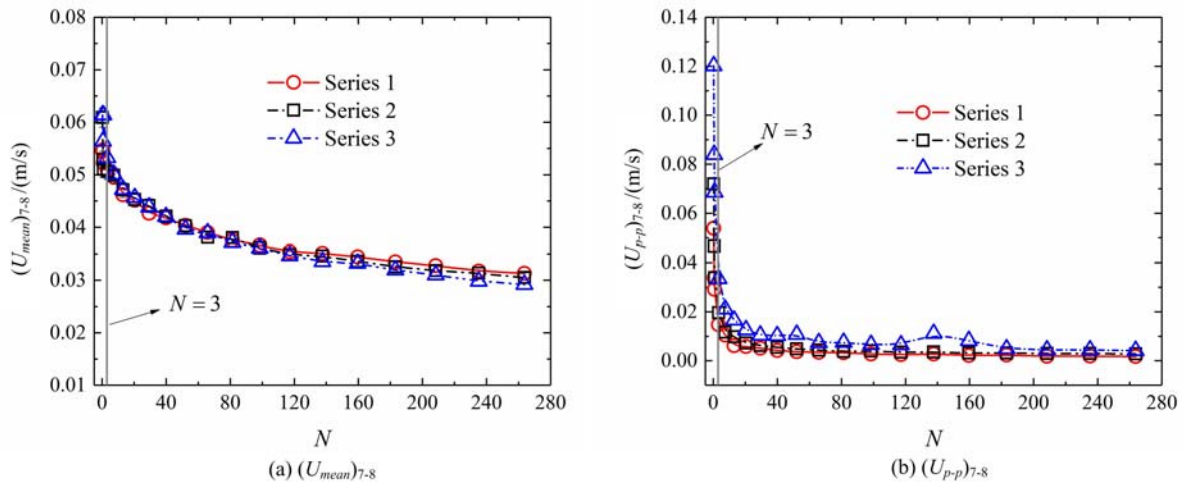


图 9 不同的探针排布方式对 A7 和 A8 测量得到的流体速度的影响

Fig. 9 Influence of arrangements on velocities from probes A7 and A8

速度 $((U_{mean})_{7-8})_2$ 的相对误差为 3.49%, $((U_{p-p})_{7-8})_3$ 的相对误差为 11.16%;当 $N \geq 3$ 时,这 2 个相对误差分别为 2.50% 和 6.48%。对于第三种排布方式,与第一种排布方式测得的结果相比, $((U_{mean})_{7-8})_3$ 的最大相对误差为 16.43%, $((U_{p-p})_{7-8})_3$ 的最大相对误差为 40.84%;当 $N \geq 3$ 时,这 2 个相对误差分别为 10.18% 和 24.76%。由此可见,周围探针对金属流体的速度测量结果具有一定的影响,在第三种排布方式下,当 A7~A9 探针前面有两列探针时影响比较明显。在对测量的数据进行处理

时,如果选用的是每个探针采集的电势信号的平均值,即得到的速度为 $(U_{mean})_{7-8}$,那么,当 $3 \leq N \leq 263.68$ 时,3种排列方式下,探针 A7 和 A8 测得的 $(U_{mean})_{7-8}$ 误差为 $2.5\% \sim 10\%$,处于可接受的误差范围。实验结果也进一步证实了局部流场速度随相互作用数 N 的增大而减小。

在尾迹涡脱落频率方面,图 10 给出了 $Q=0.4\text{m}^3/\text{h}$ 时,3种不同排列方式下,探针 A7 和 A8 测量得到的圆柱尾迹流场中的涡脱落频率 f_{7-8} 随相互作用数 N 的变化。从图中可知,当 $7.33 \leq N \leq 52.09$ ($303 \leq Ha \leq 808$)时,3种排布方式测量得到的结果完全一致,即对于外加磁场下的金属流体圆柱绕流问题,尽管阵列探针都伸入到流体中一定的距离,但是测量得到的尾迹涡脱落频率不受周围探针的影响,这也说明了伸入到流体中一定距离的阵列电势探针,对于金属流体速度场非定常波动频率的测量不受到周围探针的影响。尽管壁面探针的排布方式不同,实验测得的结果仍然证实了涡脱落频率随着相互作用数增加的非单调变化趋势。

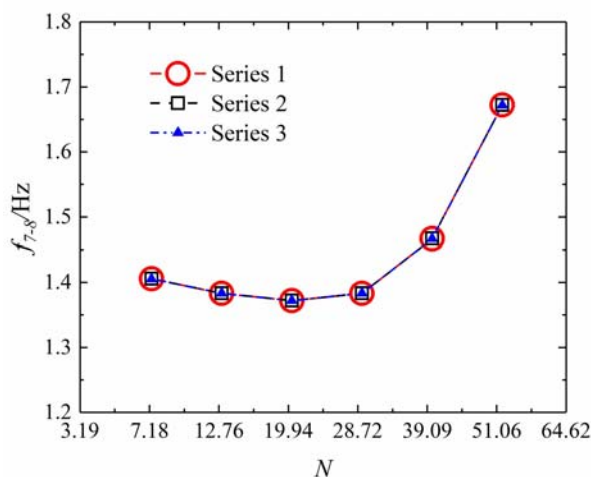


图 10 不同的探针排布方式对 A7 和 A8 测量得到的尾迹流场中涡脱落频率的影响

Fig. 10 Influence of arrangements on wake and frequency of vortex shedding from A7 and A8

3 结论

基于电势探针测量技术,本文搭建了一套多探针阵列分布的金属流体速度测量系统,并采用该测量系统对金属流体的圆柱绕流问题进行了实验研究。得出以下结论:

(1) 实验证实了阵列探针伸入到流体中对于速度场的非定常波动频率没有影响,速度测量的相对误差约为 5% 。

(2) 对于伸入到流体中的阵列探针,在 3 种不同的排列方式下,测量得到的速度结果的相对误差为 $2.5\% \sim 10\%$,而对于速度场非定常波动频率的测量则不受周围探针的影响。根据本文的实验结论,使用伸入到流体中 2mm 的阵列探针,可以有效测量金属流体非定常流动的局部速度和流场的非定常波动频率。

参考文献:

- [1] Abdou M, Sze D, Wong C, et al. US plans and strategy for ITER blanket testing[J]. Fusion Science and Technology, 2005, 47(3):475-487.
- [2] Davidson P A. An introduction to magnetohydrodynamics[M]. New York: Cambridge University Press, 2002: 119-127.
- [3] 刘凤霞, 刘志军, 王琳, 等. 用 PIV 测试涡旋波流场的速度和剪应力分布[J]. 实验力学, 2006, 21(3):278-284 (LIU Fengxia, LIU Zhijun, WANG Lin, et al. On the measurement of velocities and stress in vortex wave field with Particle Image Velocimetry[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(3):278-284 (in Chinese))
- [4] 孙望, 王鲁海, 王兆杰, 等. 基于 PIV 测量的超声波流量计内流场特性研究[J]. 实验力学, 2014, 29(6):695-

- 702 (SUN Wang, WANG Luhai, WANG Zhaojie, et al. On the internal flow field performance of ultrasonic flow meter based on piv measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(6):695—702 (in Chinese))
- [5] 陈波, 李万平. 壁面对串列双圆柱尾迹影响的实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(4):404—410 (CHEN Bo, LI Wanping. Experimental study of wall influence on the wake produced by two tandem circular cylinders[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(4):404—410 (in Chinese))
- [6] Eckert S, Cramer A, Gerbeth G. Velocity measurement techniques for liquid metal flows [J]. Magnetohydrodynamics, 2007, 80:275—294.
- [7] Stefani F, Gundrum T, Gerbeth G. Contactless inductive flow tomography[J]. Physical Review E, 2004, 70(5): 056306.
- [8] Bieberle M, Barthel F, Menz H J, et al. Ultrafast three-dimensional X-ray computed tomography[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(3):034101.
- [9] Thess A, Votyakov E V, Kolesnikov Y. Lorentz force velocimetry[J]. Physical Review Letters, 2006, 96(16): 164501.
- [10] Tan Y, Wang X, Moreau R. An innovative contactless method for detecting defects in electrical conductors by measuring a change in electromagnetic torque[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(3):03560.
- [11] Eckert S, Gerbeth G. Velocity measurements in liquid sodium by means of ultrasound doppler velocimetry[J]. Experiment in Fluids, 2002, 32(5):542—546.
- [12] Brito D, Nataf H C, Cardin P, et al. Ultrasonic doppler velocimetry in liquid gallium[J]. Experiment in Fluids, 2001, 31(6):653—663.
- [13] Franke S, Büttner L, Czarne J, et al. Ultrasound doppler system for two-dimensional flow mapping in liquid metals[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21(3):402—409.
- [14] Takeda Y, Kikura H. Flow mapping of the mercury flow[J]. Experiment in Fluids, 2002, 32(2):161—169.
- [15] Gardner R, Lykoudis P. Magneto-fluid-mechanic pipe flow in a transverse magnetic field. Part 1. Isothermal flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971, 47:737—764.
- [16] Robinson T, Larsson K. An experimental investigation of a magnetically driven rotating liquid-metal flow[J]. Journal of Fluid Mechanics 1973, 60:641—664.
- [17] Eckert S, Witke W, Gerbeth G. A new mechano-optical technique to measure local velocities in opaque fluids[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2000, 11(2):71—78.
- [18] Cramer A, Gerbeth G, Terhoeven P, et al. Fluid velocity measurements in electro-vortical flows[J]. Materials and Manufacturing Process, 2004, 19(4):665—678.
- [19] Frank M, Barleon L, Müller U. Visual analysis of two-dimensional magnetohydrodynamics[J]. Physics of Fluids, 2001, 13(8):2287—2295.
- [20] Klein R, Pothérat A, Alferenok A. Experiment on a confined electrically driven vortex pair[J]. Physical Review E, 2009, 79(1):016304.
- [21] Klein R, Pothérat A. Appearance of three dimensionality in wall-bounded MHD flows[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(3):034502.
- [22] Rhoads J R, Edlund E M, Ji H T. Effects of magnetic field on the turbulent wake of a cylinder in free-surface magnetohydrodynamic channel flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 742:446—465.
- [23] Kolesnikov Y B, Tsinober A B. Three-dimensional MHD flow past a cylinder of finite length [J]. Magnetohydrodynamics, 1971, 2:144—146.
- [24] Kolesnikov Y B, Tsinober A B. Experimental investigation of two-dimensional turbulence behind a grid[J]. Fluid Dynamics, 1974, 9(4):621—624.
- [25] Kolesnikov Y B, Tsinober A B. Two-dimensional turbulent flow behind a circular cylinder [J]. Magnetohydrodynamics, 1972, 3(3):23—31.
- [26] Kit L G, Turuntaev S V, Tsinober A B. Investigation with a conduction anemometer of the effect of a magnetic field on disturbances in the wake of a cylinder[J]. Magnetohydrodynamics, 1970, 6(3):331—335.
- [27] Kolin A. Electromagnetic method for the determination of velocity distribution in fluid flow[J]. Physical Review, 1943, 63:218—219.

- [28] Müller U, Bühler L. Magnetofluidynamics in channels and containers[M]. Springer Science & Business Media, 2001:195–200.
- [29] Sommeria J. Experimental study of the two-dimensional inverse energy cascade in a square box[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 170:139–168.
- [30] Messadek K, Moreau R. An experimental investigation of MHD quasi-two-dimensional turbulent shear flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 456:137–159.
- [31] Yang J C, Qi T Y, Ni M J, et al. Flow patterns of gainsn liquid on inclined stainless steel plate under a range of magnetic field[J]. Fusion Engineering Design, 2016, 109:861–865.
- [32] Yang J C, Qi T Y, Ren D W, et al. Rearrangement of liquid metal surface waves by a uniform transverse magnetic field[J]. Experiment in Fluids, 2018, 59(11):1–16.
- [33] Yang J C, Qi T Y, Ren D W, et al. Magnetohydrodynamic effects on liquid metal film flowing along an inclined plate relating to plasma facing components[J]. Nuclear Fusion, 2020, 60(8):086003.
- [34] Morley N B, Burris J, Cadwallader L C, et al. Gainsn usage in the research laboratory[J]. Review of Sciebtific Instruments, 2008, 79(5):056107.
- [35] Mück B, Günther C, Müller U, et al. Three-dimensional MHD flows in rectangular ducts with internal obstacles [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 418:265–295.

Experimental study on the measuring method of liquid metal flow with array electric potential probe

ZHANG Xiangfei¹, YANG Juancheng², LÜ Ze¹, ZHANG Nianmei¹

(1. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: Velocity measurement of opaque liquid metal plays a very important role in electromagnetic metallurgy and nuclear energy fields, which can provide direct data support for the interpretations of related phenomena. Based on the Ohm's law in electromagnetism, a velocity measurement system with multi array electric potential probes for metal fluids is developed. The probe arrangement, data collection system and data processing method are all introduced in detail with the help of the flow around a cylinder under a magnetic field. The influences of probe insertion and arrangement on the measurement results are verified experimentally. The results show that the velocity error is about 5% when the probe is inserted into the fluid about 2mm. But the measuring error caused by the probe arrangement is 2.5%~10%, if the probe is close to the wall. In addition, the experiment also reveals that the insertion of array probes into the fluid does not affect the measurement of fluctuation frequency of the metal fluid and the frequencies of flow field are also not affected by the surrounding probes.

Keywords: liquid metal; electric potential probe; MHD (Magnetohydrodynamics); magnetic field; flow field measurement