

DOI: 10.7652/xjtuxb202002016

交流电热流对导电岛纳米电极介电组装的影响

崔祥干, 丁海涛, 杜山
(长春理工大学机电工程学院, 长春 130022)

摘要: 为了获得导电岛纳米间隙电极系统中纳米颗粒介电组装成的纳米粒子链的形貌规律,在所制备出的导电岛纳米间隙电极系统中进行了纳米颗粒介电组装实验。基于纳米颗粒介电操控理论,建立了导电岛纳米间隙电极组装体系的纳米颗粒介电组装模型,并通过数值仿真方法,对该介电组装模型中的电场分布和介电组装过程中纳米颗粒所受的介电泳力、交流电热流以及两者合作的电动力学行为进行了分析,探究了交流电热流对导电岛纳米电极介电组装的影响。实验发现:在导电岛纳米间隙电极系统中纳米颗粒的介电泳组装具有两种模式——纳米间隙之间的体组装与电极和导电岛表面上的面组装,并且组装模式的强弱程度受频率的影响,进而造成组装形成的纳米粒子链的分布和形态的不同。仿真结果表明:当频率增大到 350 kHz 时,纳米缝两侧电热流向发生反向;在频率为 150 kHz 且缝宽为 500 nm 时,会在整条纳米缝任意位置(端点处外)出现电热流旋涡,并且电热流旋涡会随着驱动频率的增加而减弱;随纳米缝宽度减小,电热流对纳米粒子介电组装的影响减弱。

关键词: 导电岛纳米间隙电极;交流电热流;介电泳;金纳米粒子链;数值仿真
中图分类号: TN305 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)02-0127-10

Influence of AC Electrothermal Flow on Dielectro-Phoretic Assembly in a Conductive-Island Nanogap Electrode System

CUI Xianggan, DING Haitao, DU Shan
(College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Dielectrophoretic assembly experiments of nanoparticles in a prepared conductive-island nanogap electrode system is carried out to obtain the morphology of nanoparticle chains formed by dielectrophoretic assembly of nanoparticles in the conductive-island nanogap electrode system. A dielectrophoretic assembly model of nanoparticles in the conductive-island nanogap electrode assembly system is established based on the dielectrophoretic manipulation theory of nanoparticles. The electric field distribution in the dielectrophoretic assembly model, as well as the electrokinetic behavior of dielectrophoresis, alternating current electrothermal flow and their interaction in the assembly process, is analyzed through numerical simulation. The effects of alternating current electrothermal flow on dielectrophoretic assembly in the conductive-island nanogap electrode system are investigated. It is found that the dielectrophoretic assembly of nanoparticles in the conductive-island nanogap electrode system has two modes: the bulk assembly between the nanogaps, and the surface assembly on the surfaces of the electrode and the

conductive island. Moreover, the states of the assembly mode are affected by driving frequencies, which leads to different distribution and morphology of the assembled nanoparticle chains. Simulation results show that when the frequency increases to 350 kHz, the electrothermal flow direction reverses on both sides of the nanogap; when the frequency is 150 kHz and the width of nanogap is 500 nm, the electrothermal flow vortices appear at any position of the entire nanogap (outside the end point). The electrothermal flow vortices weakens with the increase of driving frequency, and the effect of the electrothermal flow on the dielectrophoretic assembly of nanoparticles decreases with the decrease of the width of nanogaps.

Keywords: conductive-island nanogap electrode; alternating current electrothermal flow; dielectrophoresis; gold nanoparticle chain; numerical simulation

非均匀电场中,悬浮在液态介质中的可极化纳米颗粒会受到介电泳(DEP)的作用。例如,在介电泳力作用下,纳米粒子^[1]、碳纳米管^[2-3]、纳米线^[4-5]、生物细胞^[6]等纳米颗粒会定向移动,从而实现低维纳米结构在特定位置的操控。利用介电泳技术操控纳米对象,需要电极对之间具有较高的电场强度梯度来控制操控对象的定向移动,这种方法能够将悬浮液中的纳米颗粒组装成纳米粒子线,从而实现相邻电极对的有效连接。Bhatt等在电极对组装体系中发现介电组装成的纳米粒子线存在两种生长模式——电极上的面组装模式和电极间的体组装模式,并且纳米粒子的组装模式会对粒子线的质量产生重要影响^[7]。这些纳米粒子线能够应用于微纳传感器中,例如 Leung等在平面微电极对的间隙中,把介电组装金纳米粒子制作成了具有良好性能的热量传感器^[8];Kumar等把氧化锌纳米粒子组装到平面电极对间隙中制作成了高灵敏度的紫外传感器等^[9]。

导电岛电极系统是悬浮在平面电极对间隙中的一个或多个导电结构单元与电极对构成的电极结构系统,是实际微电子电路的一种简化模拟模型。深入研究该系统对柔性微电子器件和湿电子电路的开发与性能提高具有重要意义。Hermanson等通过实验证明了微电极间隙中的导电岛会引导纳米粒子介电组装成电功能微线,从而将孤立的导电元件互连起来^[10]。Ding等采用在三角电极间隙中沉积菱形导电岛形成的导电岛微电极系统对该系统中纳米粒子成链机制进行了研究,发现纳米粒子线的形态受到驱动频率的影响^[11];随后,该课题组通过改变导电岛的结构特征,调控空间电场梯度分布,改善了纳米粒子线的形貌和质量^[12]。

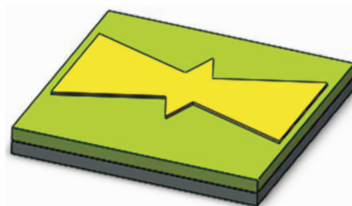
与微米间隙电极系统相比,纳米间隙电极系统的工作面积更小,这不仅有利于提高基于纳米间隙电极器件的集成度,使检测限更低,而且,电极间隙

尺寸的减小进一步缩短了载流子的传输时间,导致响应速度加快,电子被电极捕获的概率增加,进而能够提升基于纳米间隙电极器件的响应率,即获得更高的灵敏度。本文基于溶胀法制作了导电岛纳米间隙电极系统,针对这种电极系统,通过实验和仿真相结合的方法分析了纳米颗粒的介电组装,获得了纳米颗粒的组装模式和机理,以及纳米粒子线形成过程的影响因素及规律,为高灵敏度传感器件的制造提供了参考。

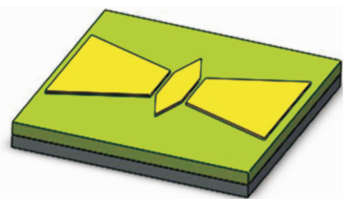
1 介电组装实验与数值仿真

1.1 实验工艺与过程

传统的纳米间隙电极制备方法存在一定的局限性。例如,电子束刻蚀法的邻近效应将会造成电极缺陷^[13],机械断裂法需要通过机械装置实现单个纳米间隙电极的制造^[14]。本文采用光刻工艺与溶胀作用相结合的方法^[15-16]制备导电岛纳米间隙电极。电极结构示意图如图1所示。



(a)光刻工艺形成的电极结构



(b)经溶胀拉伸后形成的纳米缝电极结构

图1 导电岛纳米间隙电极结构示意图

首先在玻璃基底上旋转涂覆环氧树脂,待环氧

树脂凝固后,涂覆光刻胶并通过光刻定义导电岛纳米间隙电极图案,随后依次溅射黏附层金属铬和导电层金属金,再进行显影与图形化转移,最后将样片浸入酒精进行溶胀,形成纳米缝的导电岛纳米间隙电极。纳米缝宽度很容易受电极厚度和溶胀时间等因素的影响,本实验中纳米缝的宽度约为 500 nm。

在介电泳组装实验中,采用购于英国 BBI 公司的半径为 10 nm 的金纳米粒子。实验装置见图 2a。把一滴 3 μ L 的悬浮液滴于电极系统中,再将加电装置 Wentworth Laboratories MP1008 探针系统置于电极两端,并由函数发生器(Agilent 33220A)施加峰值为 10 V 的电压,驱动频率为 150 kHz $\sim$ 1 MHz。在两个电极之间接入 Tektronix TDS 220 示波器进行电压监测。当示波器出现电压突降时,函数发生器关闭,实验完成,最后将样片用去离子水清洗,并用氮气干燥。

1.2 数值仿真模型的建立

仿真模拟采用 Comsol Multiphysics 5. 2a 有限元商业软件包进行。计算域和用于表征粒子行为的截面示意图如图 2b $\sim$ 2d 所示,截面一是穿过导电岛和电极中线的 xz 平面,截面二是穿过左端纳米间隙中线的 yz 平面。采用三维空间维度的多物理场分析电流、流体传热和层流。在电流场中,电极对上

的电势规定为 $V=V_{pp}/2=5$ V 和 $V=0$ V,其中 $V_{pp}=10$ V 代表实验中所施加的电压的峰峰值;除导电岛外,其余表面电绝缘;导电岛的电导率为 10^7 S/m。在流体传热场中,流体的导热系数为 0.6 W/(m $\cdot$ K);环境温度设为 293. 15 K,液滴的外表面和硅基底外表面都规定为热绝缘表面。层流场中,流体为不可压缩流动(忽略惯性项);流体密度与动力学黏度分别为 1 000 kg/m³ 和 0. 001 Pa $\cdot$ s;所有界面和固体表面都是非滑移边界条件;并定义立方体计算域上部某一顶角为 0 Pa 压力点。

2 结果与分析

2.1 实验结果

图 3a 为 350 kHz 时纳米缝电极系统的金粒子组装整体图,可以看到金粒子的组装连接了两条纳米缝之间的金属区域,形成了导电岛结构。在图 3b 中,频率为 150 kHz 时,在电极间隙处生长了大量的纳米粒子线,纳米粒子线横跨电极,在纳米缝处形成隆起,且生成的纳米粒子链覆盖了整条纳米缝,纳米粒子线较厚,在电极与导电岛表面存在纳米线的延伸;在电极与岛断裂的豁口的端点的左边缘,同样覆盖了大量的粒子线。在图 3c 中,频率为 350 kHz,有的纳米线横跨纳米缝并垂直于纳米缝电极的

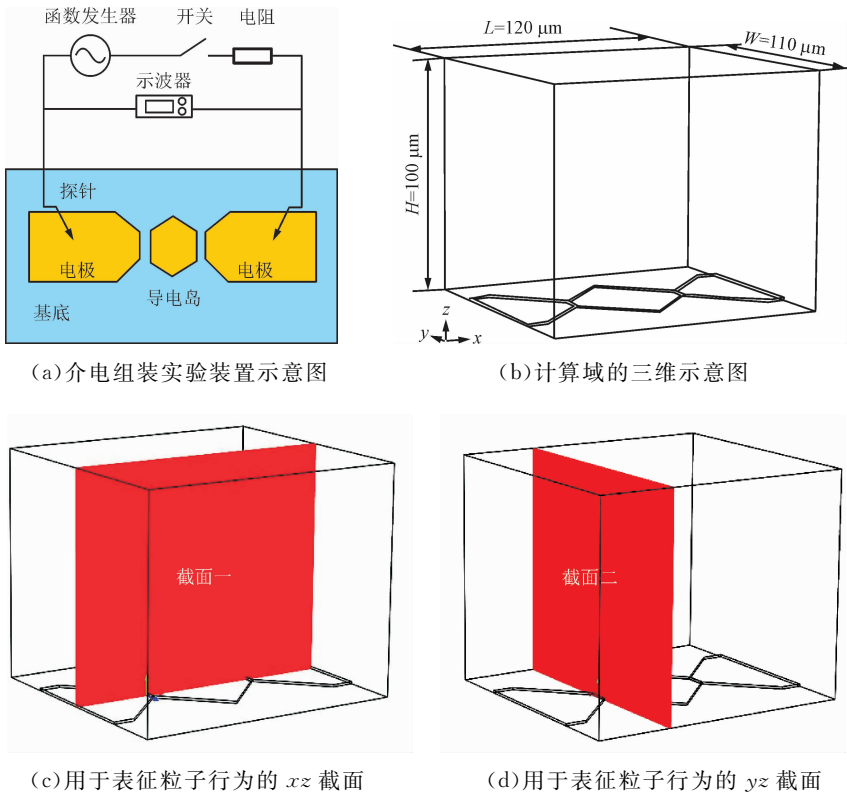
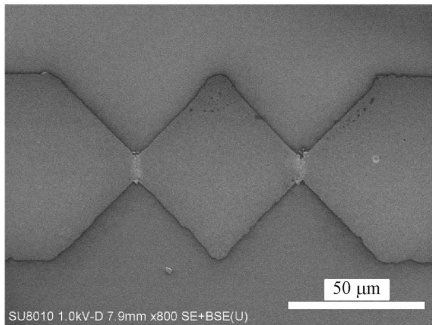


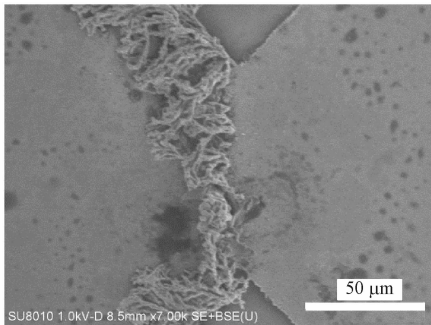
图 2 实验装置与导电岛三维仿真模型示意图

边缘,有的在纳米缝内部。沿着缝长方向纳米线分布较为均匀;在豁口左右两边纳米粒子线较多。在图 3d 中,频率为 1 MHz,在纳米缝之间生长着较少的纳米粒子线,直径更细,而且主要分布在纳米缝断

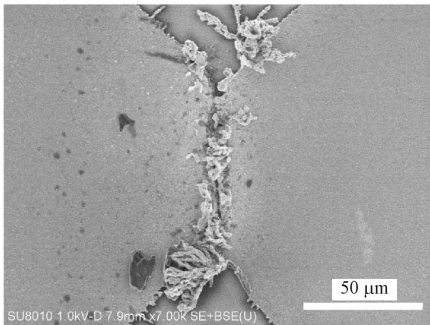
裂的豁口处。另外,3 种不同频率的实验中,纳米缝的宽度一致(500 nm),完成组装的时间(示波器出现电压突降时)不同,随频率增大,组装时间依次为 3.2、5.5、8.6 s。



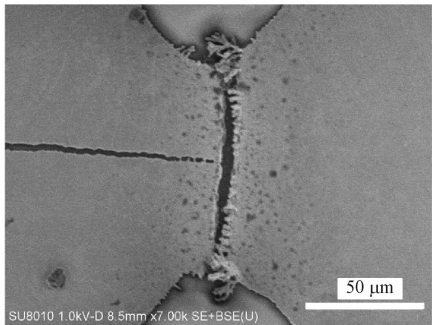
(a)350 kHz 时介电泳组装整体图



(b)150 kHz 时右侧纳米缝局部图



(c)350 kHz 时右侧纳米缝局部图



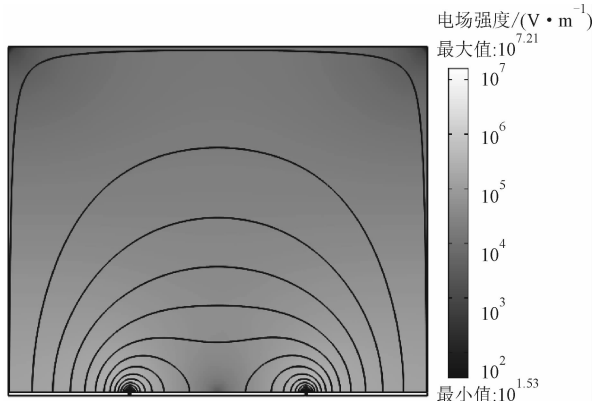
(d)1 MHz 时右侧纳米缝局部图

图 3 介电泳组装实验结果的电镜图

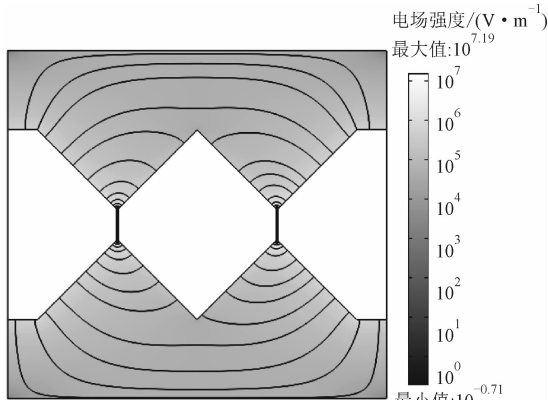
2.2 电场的分布

首先,在电极系统出现变化时,电场分布会发生明显的变化,并对随后的介电泳组装造成影响,因此探究电场梯度分布对研究粒子组装特性的影响有着不容忽视的意义。电场分布的仿真结果如图 4 所示。

在具有一定长宽比的纳米缝导电岛电极系统(导电岛和电极有一定距离的彼此平行的边缘)的电场分布图(图 4a)中,电场线在纳米间隙处最为密



(a) xz 截面的电场强度分布



(b) xy 截面的电场强度分布

图 4 纳米缝电极系统的电场强度分布

集,这表明在纳米缝组装区域的电场强度比电极表面大得多,说明将具有纳米缝的电极结构用于介电泳组装是可行的。在图 4b 中,在电极与导电岛之间的纳米缝中,电场线与电极和导电岛表面垂直而且电场线彼此平行,分布也更加密集。

2.3 粒子介电泳力

当外加电场 E 的相位分布没有空间变化时,利

用点偶极(PD)方法可以得到悬浮在液体中的球形粒子的时均介电泳力^[17]

$$F_{\text{dep}} = \pi \epsilon_f R^3 \text{Re}[f_{\text{CM}}(\omega)] \nabla (\tilde{E} \tilde{E}^*) \quad (1)$$

式中: ϵ_f 为液体介质的介电常数, $\epsilon_f = 80\epsilon_0$ ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m, 是真空介电常数); R 为球形粒子的半径; $\text{Re}()$ 是复函数的实部; $\tilde{E}$ 是电场向量振幅, $E = \text{Re}(\tilde{E} e^{j\omega t})$, ω 是时谐激励的角频率, j 为虚数单位; $*$ 为复共轭符号; $f_{\text{CM}}(\omega)$ 是与频率相关的克劳修斯-莫索提(CM)因子, 表示球形粒子相对于其周围液体介质的有效极化, 表达式为

$$f_{\text{CM}} = \left(\frac{\tilde{\epsilon}_p - \tilde{\epsilon}_f}{\tilde{\epsilon}_p + 2\tilde{\epsilon}_f} \right) \quad (2)$$

$$\text{Re}[f_{\text{CM}}(\omega)] =$$

$$\frac{(\epsilon_p - \epsilon_f)(\epsilon_p + 2\epsilon_f) + (\sigma_p - \sigma_f)(\sigma_p + 2\sigma_f)/\omega^2}{(\epsilon_p + 2\epsilon_f)^2 + (\sigma_p + 2\sigma_f)^2/\omega^2} \quad (3)$$

其中 $\epsilon_p = \epsilon_0$ 代表粒子的介电常数, $\tilde{\epsilon}_p = \epsilon_p - j\sigma_p/\omega$ 和 $\tilde{\epsilon}_f = \epsilon_f - j\sigma_f/\omega$ 为相应的复介电常数, 粒子与液体介质的电导率为 $\sigma_p = 0.01$ S/m, $\sigma_f = 0.0004$ S/m。

解式(3)^[9]即得特定频率下CM因子的实部。当 $\text{Re}[f_{\text{CM}}(\omega)] > 0$ 时, 表示粒子受到正介电泳力, 粒子移向场强高的区域; 当 $\text{Re}[f_{\text{CM}}(\omega)] < 0$ 时则相反; $\text{Re}[f_{\text{CM}}(\omega)] = 0$ 时, 介电泳交叉频率大约为 1.6 MHz。经计算, 在小于 1.6 MHz 时, 纳米粒子受到正介电泳力, 纳米缝组装区域的电场强度比其他区域的大, 因此纳米粒子移向纳米缝, 如图 5 所示。

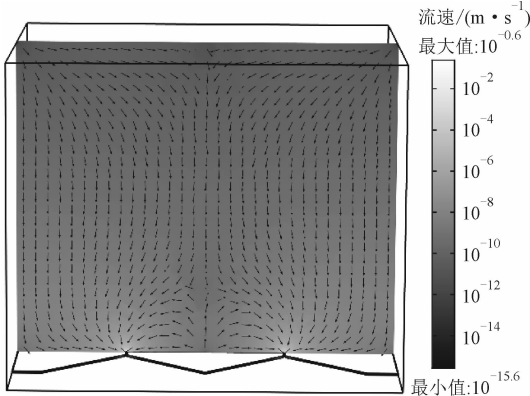


图5 150 kHz 时截面一上的介电泳力流速分布

2.4 交流电热流

在电动力学系统中, 电场会作用在流体中的电荷、偶极子以及粒子上, 导致力作用在流体上而产生流动。在微电极系统中, 在电解质中存在场驱动流体流动(交流电渗流和交流电热流)和自然对流。在实际情况下, 大多数自然对流可以忽略^[18]。在交流电场中, 流体流动方向和流动速度取决于很多相互联系的因素, 如频率、电压等。当频率大于 100 kHz

时, 电热流为主导的流体流动^[19]。因此, 在实验中, 电热流对粒子的运动有着重要的影响。

在内部溶液的最小最大温升限制下, 流体单元受到的平均电热体积力为^[19]

$$\langle f_{\text{et}} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \left[\frac{\epsilon_f(\alpha - \beta)}{1 + j\omega\tau} (\nabla T \tilde{E}) \tilde{E}^* - \frac{1}{2} \alpha \epsilon_f (\tilde{E} \tilde{E}^*) \nabla T \right] \quad (4)$$

式中: T 为液体悬浮液中的温度; $\tau = \epsilon/\sigma$ 为体溶液的电荷弛豫时间; $\alpha = -0.004 \text{ K}^{-1}$ 为液体介质介电常数的热扩散系数; $\beta = 0.022 \text{ K}^{-1}$ 为液体介质电导率的热扩散系数。式(4)等号右边 $\frac{\epsilon_f(\alpha - \beta)}{1 + j\omega\tau} (\nabla T \tilde{E}) \tilde{E}^*$ 项是由非等温电场中的电荷感应引起的库仑力, $\frac{1}{2} \alpha \epsilon_f (\tilde{E} \tilde{E}^*) \nabla T$ 项是由束缚电荷对外电场的响应引起的介电力^[20]。

如果令方程(4)等于 0, 则可以得到一个临界的交叉频率, 该频率近似为^[21]

$$f_{\text{cross-over}} = \frac{\sigma_f}{2\pi\epsilon_f} \sqrt{1 - 2\beta/\alpha} \approx 298 \text{ (kHz)} \quad (5)$$

考虑到这些液体的不均匀性, 必须在整个微电极器件中求解与内部温度场有关的能量平衡方程^[22]

$$k \nabla^2 T + \frac{1}{2} \sigma_f (\tilde{E} \tilde{E}^*) = 0 \quad (6)$$

式中: k 为液体介质的导热系数, 值为 $0.6 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$; 等号左边第二项为焦耳热源。

对于流体输运, 低雷诺数不可压缩流体的稳态纳维叶-斯托克斯方程为

$$\left. \begin{aligned} -\nabla p + \nabla [\eta (\nabla \mu + \nabla \mu)^T] + \langle f_{\text{et}} \rangle &= \mathbf{0} \\ \nabla \cdot \mu &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: p 为液体压力; μ 为流体速度矢量。

图 6 为在截面一、二上, 当频率为 150 kHz、350 kHz、1 MHz 时电热流的仿真结果。在 150 kHz 时, 截面一上电热流左右呈现对称分布, 总共存在 4 个流体旋涡, 并且在纳米缝上方的流动方向是向下的, 在纳米缝左右两侧流向相反, 在一定高度上交汇向上流动; 而在截面二上, 纳米缝上方流动方向向下, 两侧流体流向纳米缝。在 350 kHz 时, 截面一上电热流同样成左右对称分布, 但是在纳米缝两侧的电极表面和导电岛表面的发生流向反向, 在一定高度处会出现发散的旋涡(不会引起纳米粒子的停滞); 在截面二上, 同样发生流向反向, 并且在导电岛上方形成一对旋涡, 在纳米缝表面流向先是向上而后分流向两侧流动。在 1 MHz 时, 大致同 350 kHz

时一致,但是在纳米缝的电极一侧出现明显的旋涡,而在导电岛一侧旋涡不完整;而在截面二上,相较于 350 kHz 时,旋涡消失,出现从纳米缝上方及两侧向流域域上部中线位置的流动。从 350 kHz 时截面

二的流向分布(图 6d)以及 1 MHz 时截面二的流向分布(图 6f)可以看出,纳米缝处流向向上这一趋势在一定程度上降低了纳米粒子线的厚度,这与 350 kHz 和 1 MHz 时的实验结果相吻合。

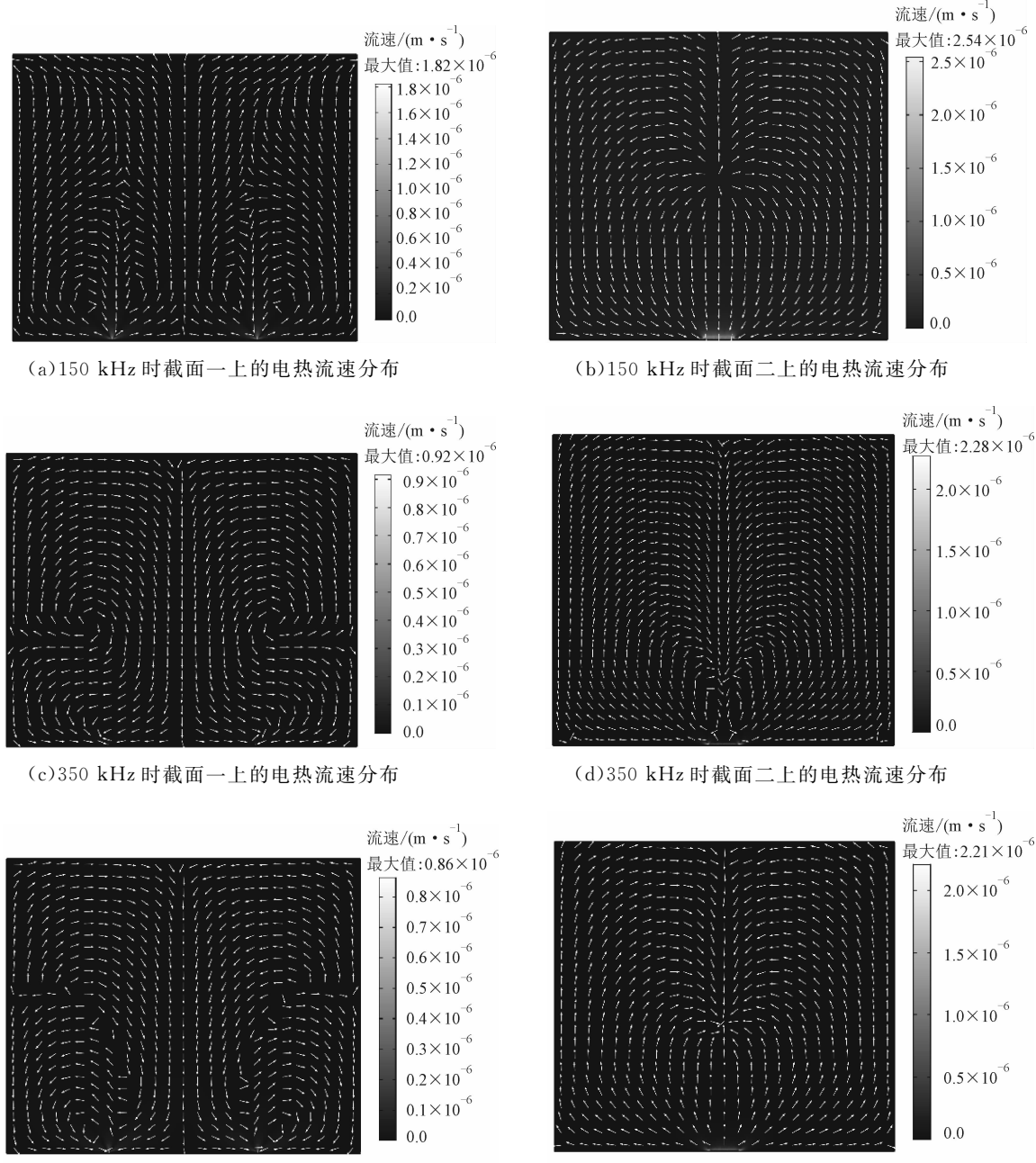


图 6 不同频率下不同截面的电热流速分布

为了进一步探究纳米缝组装区的电热流仿真结果,本文优化了仿真过程中的网格划分,得到图 7 所示的纳米缝中的电热流线及流速分布图。

从图 7a 中可以明显地观察到,在纳米缝上方,流体向下流动,并在接近电极和导电岛表面时出现分流,分别扫过电极与导电岛,同时在纳米缝组装区

内部,存在一对大小一致的对流旋涡。本文认为,纳米缝内部流体循环不仅与外部流体循环存在联系(粒子流入或流出纳米缝),而且纳米缝内部流体循环会造成纳米粒子在纳米缝中进行体组装形成粒子线,这也证实了实验观察到的现象。图 7b 中,电极上方流来的流体扫过电极表面,并流经纳米缝的左

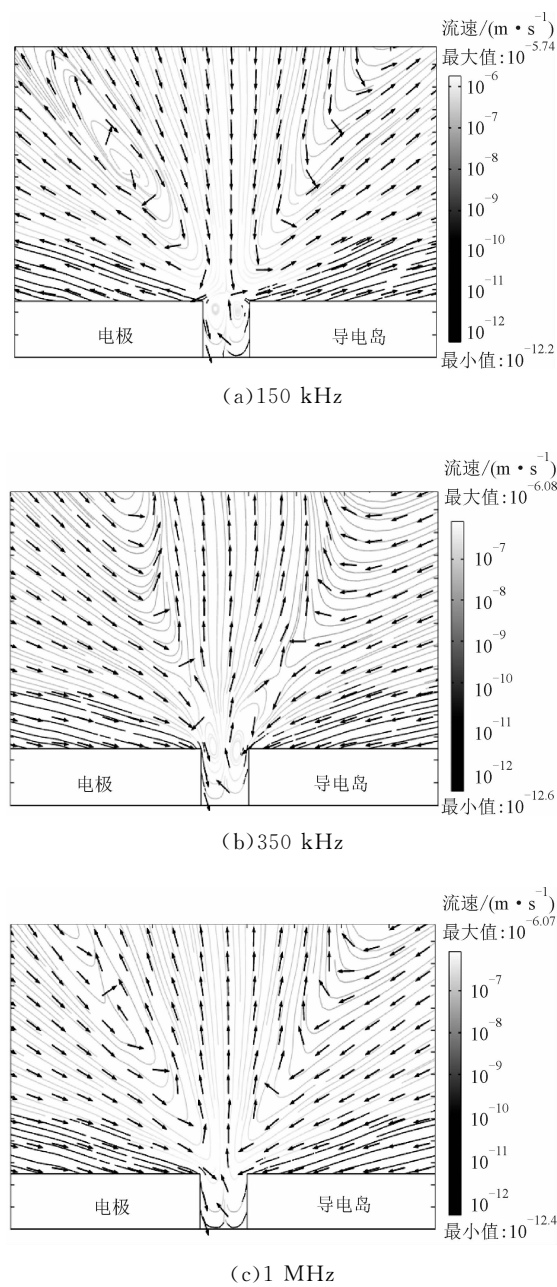


图 7 不同频率下截面一上纳米缝组装区的交流电热流流线及流速分布图

半部分,形成流动的旋涡,同时导电岛上方的流体一样扫过导电岛表面,并在纳米缝右半部分处形成流动旋涡。纳米缝两侧流动反向,有利于纳米粒子在电极和导电岛表面进行面组装。图 7c 中,左右两侧流体在扫过纳米缝后,并没有因为相遇而形成粒子停滞区,而是一起向上流动。综合来看:在同一截面的局部位置(纳米缝组装区),随着频率不断增加到 1 MHz 时,纳米缝中的旋涡逐渐消失,最终两侧流体扫过半边纳米缝,并在纳米缝中间汇流,随后向上流动。因此,150~350 kHz 的频率范围是有益于纳米粒子在纳米缝中组装的。

本文认为,纳米缝内部的旋涡是造成纳米粒子填充纳米缝的关键,为此进一步研究了平行于截面一所在截面的纳米缝内部旋涡存在情况。在频率保持 150 kHz 不变、缝宽为 500 nm、仅在改变截面位置的一系列仿真结果(图 8)中发现:在位置 1 $y=0$,图 7a 和位置 2 的数值仿真图中都存在一对旋涡,位置 2 处旋涡形状相较于位置 1 的旋涡形状几乎是一致的,这与纳米粒子在纳米缝长度方向上分布较为均匀相吻合。在位置 3 处旋涡消失,流体靠近电极和导电岛壁流动到纳米缝底部。在位置 4 处流体从豁口中向两侧流动并向上扫过电极与导电岛表面,同时在壁边缘形成粒子停滞区,造成实验结果中豁

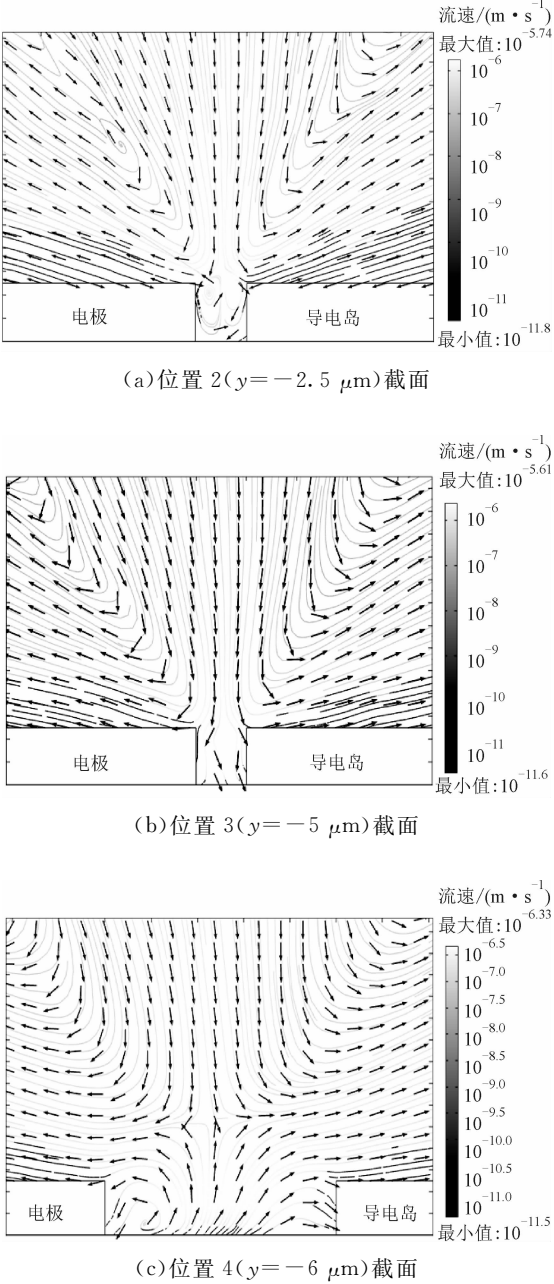
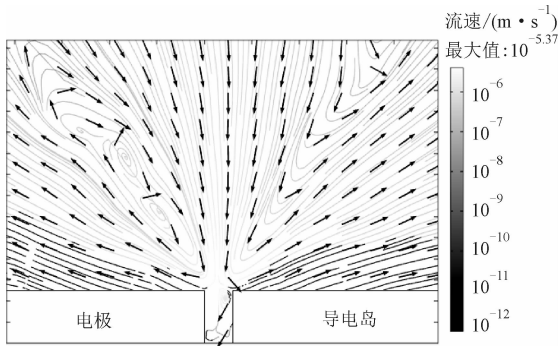


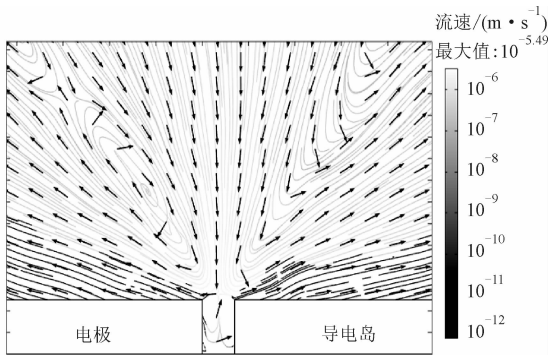
图 8 不同位置截面上纳米缝处交流电热流流线及流速图

口边缘组装的纳米粒子线较多。

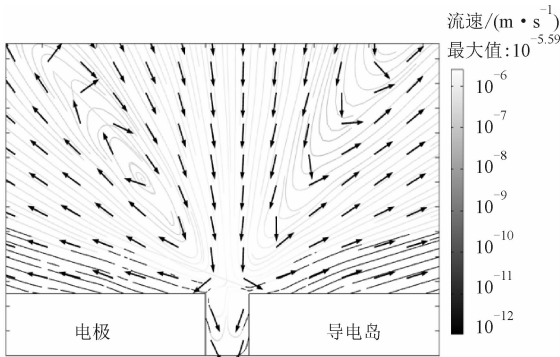
为了探究纳米缝宽度对纳米粒子组装特性的影响,保持频率 150 kHz 不变,设置纳米缝宽度分别为 300、350、400、500 nm。缝宽 500 nm 的结果见图 7a。由图 9 可以看出:在缝宽为 300 nm 时,纳米缝中的纳米粒子受到交流电热的影响减弱,仅存在一个旋涡,相较于一对反向旋涡来说,粒子停滞减缓。当纳米缝宽度在 350~500 nm 的范围时,纳米缝中都会存在一对方向相反的旋涡,这样容易造成纳米粒子的停滞,使得纳米粒子进行体组装填充纳米缝槽。这一发现为后续通过改变纳米缝宽度调控纳米粒子数量从而改善相应纳米器件的性能奠定了理论



(a)缝宽 300 nm



(b)缝宽 350 nm



(c)缝宽 400 nm

图9 不同缝宽下截面一上纳米缝处交流电热流流线及流速图

基础。

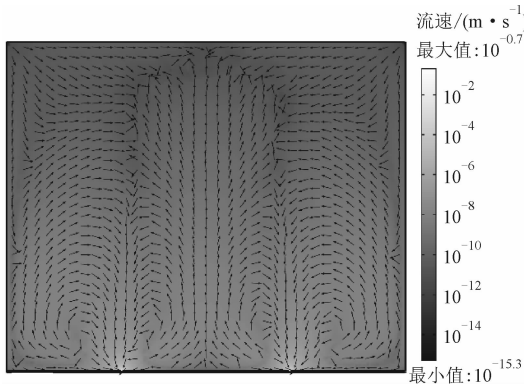
2.5 合场作用

在中高频下,交流电热是影响介电组装的主导因素。因此,单个纳米粒子的移动速度 $\mathbf{v}$ 可以表示为介电泳力引起的流速与流体输运速度 $\mathbf{u}$ 的矢量和

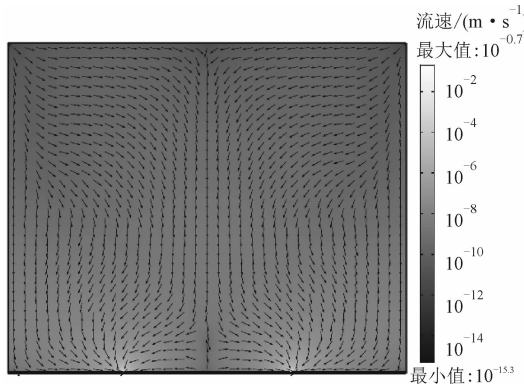
$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{F}_{\text{dep}}}{6\pi\eta R} + \mathbf{u} \tag{8}$$

式中: η 是流体的动力学黏度,取值 0.001 Pa·s。

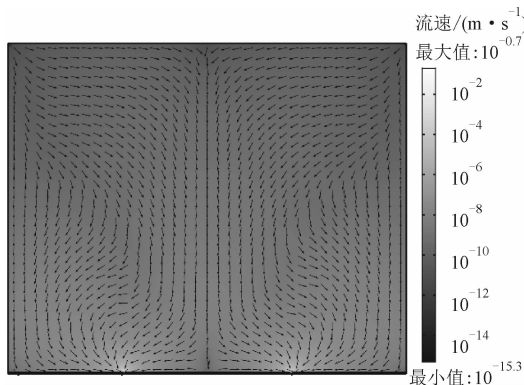
图 10 是考虑介电泳力和电热流的合作作用的流速分布仿真图。在 150 kHz 时,在远离纳米缝组装



(a)150 kHz



(b)350 kHz



(c)1 MHz

图10 不同频率下截面一上合作用下的流速分布图

区的远场区域,合作用产生了旋涡使粒子产生运动。在 350 kHz 时,在电极和导电岛上方,合作用的方向发生反向,流向则是向着纳米缝组装区,并且在远场区域处的合作用流旋涡消失。1 MHz 时的合作用基本与 350 kHz 时一致。在纳米缝近场区域,在不同频率下,展现出一致的结果即合作用方向都流向纳米缝,这是因为在纳米缝处纳米粒子的运动是由正介电泳力主导的。因此在中高频时纳米粒子的组装过程是近场的介电泳力和远场的电热体力的结合作用来实现的。

3 结 论

本文在中高频的驱动频率下进行了金纳米粒子的介电泳组装实验。结果表明:在具有纳米缝的导电岛纳米电极系统中,金纳米粒子可以在纳米缝区域进行组装,形成连接导电岛与电极的纳米粒子线。同时,进行数值仿真的建模、计算与分析,以进一步理解实验现象。在电场仿真分析中发现,电场线在纳米间隙处最为密集,这表明在纳米缝组装区域的电场强度比电极表面强。另外,交流电热对介电组装的影响是不可忽视的。当频率为 150 kHz、缝宽为 500 nm 时,不仅会在电极表面发生面组装,而且纳米缝中的局部电热流旋涡会产生体组装,不过会随着频率的增大而明显减弱。纳米粒子在纳米缝中的体组装可以填充纳米缝槽,这种纳米粒子填充纳米缝槽的现象在纳米缝长度方向分布较为均匀,在纳米缝端点外的豁口边缘组装的纳米粒子线较多。同时探究了纳米缝宽度对组装特性的影响:当频率为 150 kHz 时,缝宽在 350~500 nm 的范围内,纳米粒子更容易在纳米缝中进行体组装。最后,通过合作用场阐明,纳米颗粒在组装系统电解液中受到的电动现象是近场介电泳电动力和远场电热流综合作用的结果。

参考文献:

- [1] CHEON D, KUMAR S, KIM G H. Assembly of gold nanoparticles of different diameters between nanogap electrodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(1): 013101.
- [2] LIU Lu, SHAO Jinyou, LI Xiangming, et al. High performance flexible pH sensor based on carboxyl-functionalized and DEP aligned SWNTs [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 386: 405-411.
- [3] 陈晨. 基于介电泳技术的低维纳米材料组装 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 35-37.

- [4] DING Haitao, SHAO Jinyou, DING Yucheng, et al. One-dimensional Au-ZnO heteronanostructures for ultraviolet light detectors by a two-step dielectrophoretic assembly method [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(23): 12713-12718.
- [5] 张玉婷, 安立宝, 蔡小勇. 氧化锌纳米线介电泳组装及电学特性的实验研究 [J]. *现代化工*, 2018, 38(2): 102-107.
- ZHANG Yuting, AN Libao, CAI Xiaoyong. Experimental study on dielectrophoretic assembly and electrical characteristics of ZnO nanowires [J]. *Modern Chemical Industry*, 2018, 38(2): 102-107.
- [6] REN Yukun, LIU Weiyu, JIA Yankai, et al. Induced-charge electroosmotic trapping of particles [J]. *Lab Chip*, 2015, 15(10): 2181-2191.
- [7] BHATT K H, VELEV O D. Control and modeling of the dielectrophoretic assembly of on-chip nanoparticle wires [J]. *Langmuir*, 2004, 20(2): 467-476.
- [8] LEUNG S L, LI M, LI W J, et al. Gold nano particle-based thermal sensors fabricated using microspotting and DEP techniques [J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2012, 178: 32-39.
- [9] KUMAR S, SEO Y K, KIM G H. Manipulation and trapping of semiconducting ZnO nanoparticles into nanogap electrodes by dielectrophoresis technique [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(15): 153104.
- [10] HERMANSON K D, LUMSDON S O, WILLIAMS J P, et al. Dielectrophoretic assembly of electrically functional microwires from nanoparticle suspensions [J]. *Science*, 2001, 294: 1082-1086.
- [11] DING Haitao, LIU Weiyu, SHAO Jinyou, et al. Influence of induced-charge electrokinetic phenomena on the dielectrophoretic assembly of gold nanoparticles in a conductive-island-based microelectrode system [J]. *Langmuir*, 2013, 29(39): 12093-12103.
- [12] DING Haitao, SHAO Jinyou, DING Yucheng, et al. Effect of island shape on dielectrophoretic assembly of metal nanoparticle chains in a conductive-island-based microelectrode system [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 330: 178-184.
- [13] 崔铮. 微纳米加工技术及其应用 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2013: 154-159.
- [14] MULLER C J, VLEEMING B J, REED M A, et al. Atomic probes: a search for conduction through a single molecule [J]. *Nanotechnology*, 1996, 7(4): 409-411.
- [15] ZHAO Qiang, SHAO Jinyou, TIAN Hongmiao, et al. Batch fabrication of nanogap electrodes arrays with

- controllable cracking for hydrogen sensing [J]. *Sensors and Actuators: B Chemical*, 2018, 270: 475-481.
- [16] 邵金友, 田洪森, 刘璐, 等. 一种基于纳米间隙电极的柔性 pH 传感器及制造方法: CN104614410A [P]. 2015-05-13.
- [17] KUZYK A. Dielectrophoresis at the nanoscale [J]. *Electrophoresis*, 2011, 32(17): 2307-2313.
- [18] RAMOS A, MORGAN H, Green N G, et al. AC electrokinetics; a review of forces in microelectrode structures [J]. *Journal of Physics: D Applied Physics*, 1998, 31(18): 2338-2353.
- [19] GREEN N G, MORGAN H. AC electrokinetics; colloids and nanoparticles [M]. Hertfordshire, Baldock, UK: Research Studies Press Ltd., 2003: 72-75, 139-140.
- [20] DING Haitao, LIU Weiyu, DING Yucheng, et al. Particle clustering during pearl chain formation in a conductive-island based dielectrophoretic assembly system [J]. *RSC Adv*, 2015, 5(8): 5523-5532.
- [21] LIAN M, ISLAM N, WU J. AC electrothermal manipulation of conductive fluids and particles for lab-chip applications [J]. *IET Nanobiotechnology*, 2007, 1(3): 36-43.
- [22] HONG F J, CAO J, CHENG P. A parametric study of AC electrothermal flow in microchannels with asymmetrical interdigitated electrodes [J]. *International Communications in Heat Mass Transfer*, 2011, 38(3): 275-279.

(编辑 亢列梅)

(上接第 85 页)

- [16] DONG Li, ZHENG Danxing, WU Xianghong. Working pair selection of compression and absorption hybrid cycles through predicting the activity coefficients of hydrofluorocarbon+ionic liquid systems by the UNIFAC model [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(12): 4741-4747.
- [17] RAZZOUK A, MOKBEL I, GARCÍA J, et al. Vapor pressure measurements in the range 10^{-5} Pa to 1 Pa of four pentaerythritol esters: density and vapor-liquid equilibria modeling of ester lubricants [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2007, 260: 248-261.
- [18] SUN Yanjun, WANG Xiaopo, GONG Na, et al. Solubility of trans-1, 3, 3, 3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)) in pentaerythritol ester heptanoic acid (PEC7) and in pentaerythritol tetranonanoate (PEC9) between 283.15 K and 353.15 K [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2015, 387: 154-159.
- [19] FANG Lingyun, GAO Zanjun, WANG, Xiaoyu. Solubility and Miscibility for the Mixture of (ethyl fluoride+alkylbenzene oil) [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2014, 59(5): 1636-1642.
- [20] SUN Yanjun, WANG Xiaopo, GONG Na, et al. Solubility of dimethyl ether in pentaerythritol tetrahexanoate (PEC6) and in pentaerythritol tetraoctanoate (PEC8) between (283.15 and 353.15) K [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2014, 59(11): 3791-3797.

(编辑 亢列梅)

(上接第 102 页)

- [20] 薛诚, 宋文胜, 武雪松, 等. 考虑去磁效应的五相永磁同步电机优化开关表直接转矩控制算法 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(19): 5774-5784.
- XUE Cheng, SONG Wensheng, WU Xuesong, et al. A direct torque control algorithm considering the demagnetization effects for five-phase permanent-magnet synchronous machines using optimized switching table [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(19): 5774-5784.
- [21] 康劲松, 李旭东, 王硕. 计及参数误差的永磁同步电机最优虚拟矢量预测电流控制 [J]. *电工技术学报*, 2018, 33(24): 5731-5740.
- KANG Jinsong, LI Xudong, WANG Shuo. Optimal virtual vector predictive current control for permanent magnet synchronous motor considering parameter errors [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(24): 5731-5740.

(编辑 亢列梅)