



尘埃等离子体棘轮结构中的颗粒输运

贺亚峰^{1,2,3*}, 刘富成^{1,3}, 范伟丽^{1,2}

1. 河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002

2. 河北省计算物理基础学科研究中心, 保定 071002

3. 河北省量子场论精细计算与应用重点实验室, 保定 071002

*联系人, E-mail: heyf@hbu.edu.cn

收稿日期: 2024-08-23; 接受日期: 2024-09-26; 网络出版日期: 2025-02-08

国家自然科学基金(编号: 12275064, 12475023, 12275065, 11975089)、河北省自然科学基金(编号: A2024201020)、中央引导地方科技发展资金(编号: 236Z1501G)和河北大学科研创新团队(编号: IT2023B03)资助项目

摘要 尘埃等离子体与费曼棘轮属于两个不同的学科. 尘埃等离子体中的带电颗粒可形成强耦合弱阻尼的子系统, 通过系统内在的不稳定性或在外场调控作用下呈现出剪切流与涡流等输运现象. 费曼棘轮凭借其自身的不对称性能够将非平衡环境中的随机扰动整流成粒子的定向输运, 通过调节实验条件还能对粒子输运进行各种调控, 但以往费曼棘轮中粒子输运研究仅局限在过阻尼弱耦合的情形. 通过将尘埃等离子体与费曼棘轮这两个学科进行交叉融合, 设计出尘埃等离子体棘轮装置, 一方面为尘埃等离子体中带电颗粒的有效调控提供了一种新思路, 另一方面, 将费曼棘轮的研究拓展到强耦合弱阻尼的范畴. 本文从这两个学科当前研究方向出发, 针对近几年尘埃等离子体棘轮中颗粒输运实验现象与整流物理机制及其在颗粒分离方面的应用进行介绍.

关键词 尘埃等离子体, 颗粒输运, 费曼棘轮, 整流, 颗粒分离

PACS: 52.27.Lw, 52.25.Fi, 52.77.-j, 73.40.Ei, 64.75.Xc

1 引言

尘埃等离子体是包含尘埃颗粒的等离子体系统, 由于尘埃颗粒无处不在, 几乎所有存在等离子体的地方都会形成尘埃等离子体, 例如, 等离子体刻蚀工艺中晶圆上方形成的尘埃云、月尘喷泉、土星环、火箭尾焰以及诸多等离子体实验室等环境^[1,2]. 这些带电颗粒可形成强耦合弱阻尼子系统, 不仅给基础物理提出了许多新的科学问题, 还对空间探测器的防护与测控

等工程提出了挑战. 研究尘埃等离子体中尘埃颗粒的形成、演化、热力学与动力学以及相关科学与工程问题, 无论对于基础物理, 还是工业应用以及国防与航天工程都具有重大的科学与现实意义.

等离子体环境中固态颗粒与等离子体中的电子、离子频繁碰撞并充电, 呈现出复杂的动力学过程. 尘埃等离子体系统中存在的宏观颗粒具有特殊的时空尺度(微米、毫秒量级), 因此可以在介观尺度为研究凝聚态物理、统计物理以及流体物理等微观物理过程提

引用格式: 贺亚峰, 刘富成, 范伟丽. 尘埃等离子体棘轮结构中的颗粒输运. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 105202
He Y F, Liu F C, Fan W L. Particle transport in dusty plasma ratchet structure (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 105202, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0345

供了一个绝佳的宏观可视的研究平台^[3-16]. 尘埃等离子体的研究以往主要集中在颗粒的充电过程、尘埃声波、尘埃结晶以及相变等基本物理问题. 等离子体中的带电尘埃颗粒通过非线性不稳定性或在外部施加的电场和磁场等外场作用下还能产生定向输运, 形成剪切流和涡流等现象^[17-20]. 近些年, 利用费曼棘轮原理实现尘埃颗粒定向输运引起了广泛关注.

费曼棘轮是指具有不对称性的周期性单元结构排列, 例如光学棘轮^[21,22]、量子棘轮^[23]和有机电子棘轮^[24]等. 它能够将非平衡环境中的随机扰动整流成粒子的定向输运, 且不打破热力学第二定律^[25,26]. 特别是, 在一定的条件下, 利用费曼棘轮还可以实现粒子流的反转, 即对粒子进行双向的整流调控^[27-29]. 利用费曼棘轮这种双向整流特性以及整流与颗粒尺寸的依赖性, 还能够实现微纳米尺度颗粒的有效分离^[30-32]. 以往费曼棘轮整流实验中的粒子不带电或弱带电, 且粒子基本都是运行在液相环境中, 系统处于过阻尼弱耦合情形, 粒子输运效率较低^[28,32]. 气相等离子体环境中尘埃颗粒可形成强耦合状态且阻尼非常低, 颗粒的输运速度远大于以往液相环境中粒子的输运速度, 并能呈现出许多新现象以及具有更广泛的应用. 本文针对近些年尘埃等离子体系统中利用费曼棘轮对尘埃颗粒整流和流反转以及其在颗粒分离方面的应用展开介绍.

2 尘埃等离子体棘轮中颗粒的定向输运实验

基于费曼棘轮原理可设计出尘埃等离子体棘轮装置(图1)^[33], 其核心部分是置于水平下极板上的两个同心放置的树脂棘轮结构, 分别称为内齿和外齿, 其具有相同的锯齿单元数与不对称取向, 两齿之间形成闭合的圆形锯齿通道. 通过容性耦合氩气放电在两个水平极板间产生均匀的等离子体, 在内外齿和下极板表面形成的鞘层轮廓沿锯齿与极板平滑分布, 且沿内外齿之间的锯齿通道 θ 方向具有不对称性和周期性特征. 显然, 锯齿通道内的等离子体参量, 如电子密度和电势等, 沿锯齿通道也具有不对称性和周期性分布^[34].

微米尺度的单分散聚苯乙烯微球投入到锯齿通道后, 这些颗粒迅速充电并悬浮于锯齿通道内的鞘层边界附近. 通过调节放电功率与压强(例如, 10 W, 40 Pa),

颗粒沿锯齿通道持续地正向输运形成顺时针的颗粒流(图2(a)和(c)), 其速度达到7 mm/s, 远远超过液相系统中颗粒约几十 $\mu\text{m/s}$ 的输运速度^[28,32]. 特别是, 通过调节放电功率与压强还可以控制颗粒流的方向, 使其逆向输运形成持续的逆时针颗粒流(图2(b)和(d)). 通过参数扫描可以得到不同放电功率与压强下颗粒在锯齿通道中输运速度的相图(图2(e)), 相图中黑色曲线

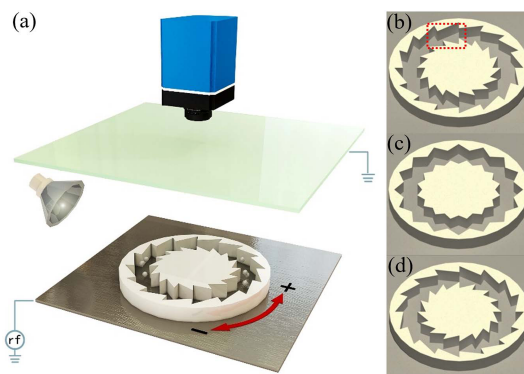


图1 (网络版彩图)尘埃等离子体棘轮装置示意图^[33]. (a) 实验装置图; (b)–(d) 三种不对称性取向的棘轮结构

Figure 1 (Color online) Diagram of dusty plasma ratchet^[33]. (a) Schematic diagram of setup; (b)–(d) three types of ratchets with different orientations in the asymmetry.

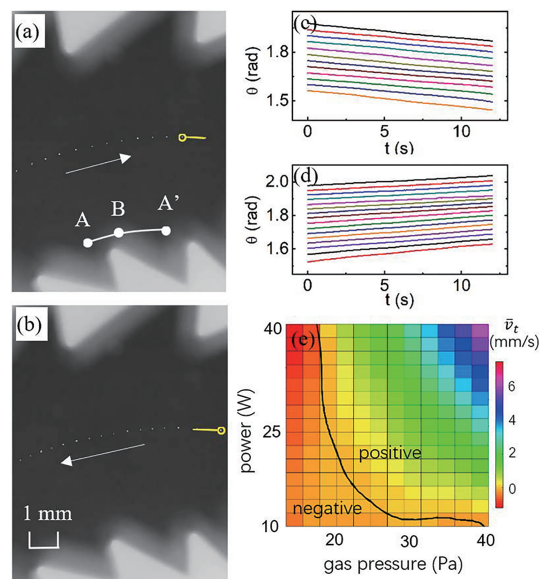


图2 (网络版彩图)双向整流实验^[33]. (a), (c) 颗粒正流; (b), (d) 颗粒逆流; (e) 颗粒整流相图

Figure 2 (Color online) Bi-directional rectification^[33]. (a), (c) Positive flow of dust particles; (b), (d) negative flow of dust particles; (e) phase diagram of particle rectification.

将相图分为两部分, 在曲线之上的参数区域, 颗粒在锯齿通道内形成持续的正流, 在曲线之下的参数区域, 颗粒做逆流输运, 如果放电参数恰好取在黑色曲线上时, 颗粒将在其平衡位置扰动, 不能形成持续的颗粒流. 根据相图可以很方便地调控颗粒在锯齿通道内的水平输运.

系统内在的不对称性是实现尘埃颗粒定向输运的一个必要条件. 尘埃等离子体棘轮中带电颗粒悬浮于鞘层中并输运, 鞘层的不对称性来自锯齿结构的不对称性. 如果将图 1(b)所示锯齿结构进行翻转, 如图 1(d), 使其形成的鞘层的不对称性也反向, 那么在相同的放电条件下颗粒的输运方向也相应反转. 特别是, 如果锯齿结构具有左右对称性(图 1(c)), 其所构成的锯齿通道内的鞘层的不对称性消失, 如果采用这种对称结构, 则无论怎样调节放电条件都不能够重现上述观察到的颗粒的定向输运现象.

颗粒的集体效应是实现尘埃颗粒定向输运的另一个必要条件. 这种集体效应体现在只有当系统中颗粒数 N 达到一定量时颗粒才能形成定向输运. 当锯齿通道内的颗粒数较少时, 其不能形成连续的链状分布, 带电颗粒将被分别约束在各个齿槽势阱内, 不能形成持续的颗粒流, $\bar{\omega}=0$, 如图 3(a)所示. 特别是, 当压强较高时, 颗粒被约束在各个齿槽内(远离通道中心), 在不对称锯齿作用下形成尘埃涡流 [35]. 当颗粒数量足够多, 能够在锯齿通道中形成连续的链状分布时, 齿槽内的颗粒通过与其相邻齿槽内颗粒的 Yukawa 相互作用可以跳出其所在齿槽向相邻齿槽运动, 形成持续的颗粒流. 这种颗粒的集体效应在有机电子棘轮和超导棘轮等其他棘轮实验系统中也被证明是形成粒子定向输运的一个必要条件 [24, 29, 36].

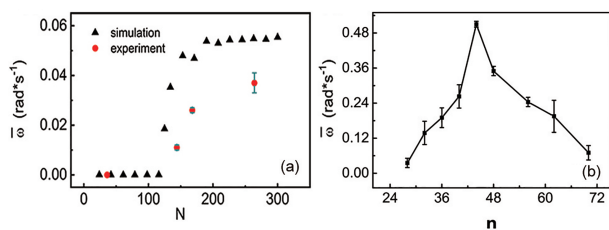


图 3 (网络版彩图)颗粒数 N 与锯齿数 n 对颗粒旋转角速度 $\bar{\omega}$ 的影响 [33, 37]. (a) 颗粒数 N ; (b) 锯齿数 n

Figure 3 (Color online) Dependence of the average angle velocity $\bar{\omega}$ of rotating dust particles on the particle number N and the sawtooth number n [33, 37]. (a) Particle number N ; (b) sawtooth number n .

除了上述两个决定颗粒产生定向输运的必要条件外, 锯齿和颗粒的材质、形状、锯齿数量等因素也会影响颗粒的定向输运, 但是这种影响只是定量的, 而非定性的. 随着棘轮上锯齿数 n 的增加, 颗粒的定向输运速度先增加后减小(图 3(b)), 这一规律与系统的不对称性有关 [37]. 当锯齿数 $n \rightarrow 0$ 或 $n \rightarrow \infty$ 时, 系统的不对称性降低, 因此, 整流效应减弱, 颗粒流速较小. 锯齿数对整流效果的影响从本质上与每个齿槽内能够容纳的颗粒数有关, 即 L/d , 其中 L 为单个齿槽长度, d 为颗粒平均间距. 当锯齿通道内颗粒呈单链分布, 且 $L/d=7$ 时, 即每个齿槽内容纳约 7 个颗粒时, 颗粒输运速度达到极大值, 此时的 N 和 n 是整流效果的最优化参量. 此外, 采用金属材质的内外齿同样能够实现颗粒的定向输运 [38], 金属棘轮中颗粒输运速度比树脂材质棘轮中的高约 3 倍. 这是由于金属棘轮的电位更低, 沿锯齿通道方向的电场较强, 引起的离子拖拽力也较大, 使得颗粒的整流速度较快. 根据轨道运动限制充电理论, 由于尘埃颗粒的带电量主要取决于颗粒尺寸和等离子体密度等参量, 在不考虑外界辐射引起的二次电子效应的情况下, 颗粒的材质对其带电量影响较小, 因此, 不同材质的颗粒在锯齿通道中的输运情况基本类似 [39].

除了利用图 1 中内外双齿构建不对称锯齿通道对颗粒的输运进行调控, 还可以利用两种单齿结构的不对称性来调控颗粒的输运. (1) 保留内齿, 并将外齿替换为透明的玻璃圆环, 仍然能够实现颗粒的双向整流. 这种结构方便利用激光透过玻璃圆环照射颗粒, 通过 Mie 散射并结合相机来测量颗粒在通道内的不对称分布, 进而推演出等离子体参量的不对称分布 [33]. (2) 将内齿去掉, 只利用外齿的不对称性来调控颗粒输运. 此时, 颗粒在外齿环中部形成尘埃云分布(图 4(a)), 在一定条件下以涡流的形式顺时针或逆时针定向旋转(图 4(b)) [40, 41].

锯齿通道的宽度对颗粒输运有一定影响. 在等离子体中, 图 1 所示的锯齿通道两侧的锯齿结构表面会形成非电中性的不规则鞘层(厚度约几毫米), 系统的不对称性来自两侧的锯齿结构. 当锯齿通道平均宽度小于两倍鞘层厚度(约 1 cm) 时, 通道两侧锯齿表面的鞘层电场将带电颗粒约束在通道中心, 此时带电颗粒能够明显地感受到不对称性鞘层中棘轮势的作用并形成定向输运. 这种较窄的锯齿通道结构能够容纳的颗粒数有限, 适合对少量的颗粒进行细致地调控其输运.

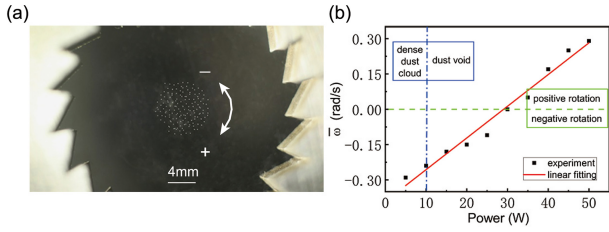


图 4 (网络版彩图)尘埃涡旋实验 [40]. (a) 尘埃涡旋; (b) 涡旋平均角速度与功率的关系

Figure 4 (Color online) Dust vortex experiments [40]. (a) Dust vortex; (b) dependence of the average angular velocity of the dust vortex on the power.

当锯齿通道宽度较宽(大于1 cm)时,其中心处鞘层的不对称性降低,对颗粒的整流效果有所减弱.在需要对大量颗粒进行整流的情形下,可以将图 1 中的平板金属下极板改为锯齿形下极板的结构设计 [42],并在其上垂直于锯齿方向设置两个直条棒,由此构建出宽度可调的锯齿通道.此时,锯齿形下极板表面形成的不对称的鞘层为系统提供整流所需的不对称性必要条件,利用这种结构能够实现对大量颗粒进行调控整流.

3 尘埃等离子体棘轮中颗粒的定向输运物理机制

尘埃等离子体棘轮中颗粒的定向输运完全取决于颗粒周围的等离子体参量,这是因为颗粒的带电量以及其主要受到的电场力和离子拖拽力等都与等离子体参量三维分布特征密切相关.颗粒通常悬浮于锯齿通道的鞘层边界附近,对于这种狭窄的锯齿通道中等离子体密度等参量很难通过常规的朗缪尔探针等方法直接实验测量,目前主要依赖于等离子体流体模拟,通过两步法并进行双正弦插值来获得锯齿通道内的等离子体三维参量分布 [43],根据获得的等离子体参量进一步利用Langevin方程模拟颗粒的输运过程 [33],数值模拟结果再通过实验进行相互验证 [34].

受内外齿表面鞘层电场的径向约束,带电颗粒通常被约束在锯齿通道中心($r=r_c$).在不同的实验参数下,颗粒在竖直 z 方向上悬浮于锯齿通道中心不同的高度上并沿锯齿通道形成 θ 方向的输运,它们的输运轨迹基本分布在沿通道中心的一个闭合的二维曲面上($r=r_c, \theta-z$ 坐标系),因此,可以将三维问题简化为二维问题,即只需要在这个曲面上研究等离子体参量的分

布特征与颗粒受力分析.

这个曲面上竖直方向电场 E_z 等值线分布呈现不对称性与周期性分布(图 5(a)),且在通道较宽处(θ_w)向下弯曲,这是由于锯齿通道宽度所呈现的不对称性与周期性变化 [44].悬浮于鞘层中的颗粒在竖直方向上的平衡高度主要由重力和鞘层电场力平衡决定(鞘层中竖直方向离子拖拽力可忽略), $mg=QE_z$,其中 Q 为颗粒带电量.由于颗粒在锯齿通道内水平输运时其带电量基本不变 [33],因此,颗粒的平衡高度取决于 E_z ,即颗粒将沿 E_z 等值线在鞘层内分布.例如,图 5(a)中半径为13 μm 颗粒(蓝球)在鞘层中沿 $E_z=-7.74 \text{ V/mm}$ 等值线分布.显然,不同半径的颗粒将分别沿各自对应的 E_z 等值线悬浮于鞘层中.

由于鞘层的非线性特征,不同 E_z 等值线上的电势分布具有其各自的分布特点(图 5(b)),这些电势线分布具有不对称性与周期性特征,是典型的棘轮势 [26],可用双正弦函数描述:

$$U(\theta) = A\Delta U \left(\sin\left(\frac{2\pi\theta}{\Theta}\right) + \frac{1}{4} \sin\left(\frac{4\pi\theta}{\Theta}\right) \right) + U_0, \quad (1)$$

其中, ΔU 代表棘轮势振幅, U_0 代表棘轮势偏置. ΔU 的符号与大小分别决定了棘轮势的不对称取向与势阱

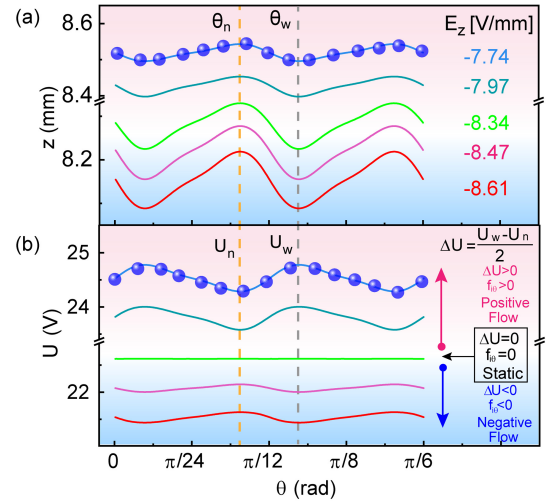


图 5 (网络版彩图)与颗粒竖直悬浮高度相关的水平输运机制 [44]. (a) 棘轮鞘中垂直电场 E_z 的等值线; (b) 等高线上对应的棘轮势

Figure 5 (Color online) Horizontal transport mechanism associated with the vertical suspension height of dust particles [44]. (a) Contours of the vertical electric field E_z in the ratchet sheath; (b) the corresponding ratchet potentials U just on the contours.

高度. 图 5 中数值模拟结果表明, 在鞘层中较高位置处, 不对称的棘轮势具有正取向 $\Delta U > 0$, 反之呈现负取向 $\Delta U < 0$. 因此, 相同尺寸的带电颗粒在鞘层中悬浮于 E_z 等值线上, 并受到对应的棘轮势作用, 不同尺寸的颗粒悬浮于不同的 E_z 等值线上, 受到其各自的棘轮势作用.

棘轮势 $U(\theta)$ 决定了带电颗粒沿锯齿通道 θ 方向的定向运输. 这是由于 $U(\theta)$ 引起 θ 方向的电场 E_θ , 此电场进一步引起角向的离子流. 该离子流对颗粒施加非平衡的离子拖拽力 $F_{i\theta}$. 由于棘轮势的不对称性, 在一个棘轮势周期内(或整个通道), 离子拖拽力积分 $f_{i\theta} = \int_0^{2\pi} F_{i\theta} d\theta$ 可不为 0, 进而驱动颗粒形成定向运输. 棘轮势的不对称性取向(ΔU 的符号)影响 E_θ 和 $f_{i\theta}$ 的符号, 进而决定了颗粒的运输方向. 棘轮势的振幅(ΔU 的大小)影响 E_θ 和 $f_{i\theta}$ 的大小, 进而决定了颗粒的运输速度. 至此, 尘埃等离子体棘轮中颗粒整流与流的反转机制一目了然: 不同尺寸的颗粒悬浮于鞘层不同的高度上, 并受到其各自的棘轮势作用; 当颗粒悬浮于较高位置时, 受到正取向棘轮势的作用, 形成正向运输的颗粒流, 反之, 当颗粒悬浮在较低位置时, 受到负取向棘轮势的作用, 形成逆向运输的颗粒流; 特别是, 当颗粒悬浮在某个中等高度时, 其受到的电势呈水平直线状分布, 不对称性消失, 颗粒不能形成定向运输. 由于颗粒的平衡高度取决于颗粒尺寸与放电条件, 因此, 可以通过调节放电条件来控制不同尺寸的颗粒进行各自的运输.

基于等离子体流体模拟揭示的这种与颗粒竖直悬浮高度相关的水平运输机制可以从两个方面分别进行独立的实验验证^[44]. (1) 通过人为抬高颗粒高度使其发生从逆流到正流的反转. 首先, 通过调节放电条件将颗粒的悬浮高度控制到较低位置, 此时, 颗粒形成逆流(图 6(a)). 然后, 按照上述运输机制, 如果固定放电条件不变, 人为抬高颗粒的悬浮高度, 使其受到的棘轮势反向, 则其运输方向将发生反转. 在实验上, 可以在已有逆向运输颗粒的基础上再投入另外一种尺寸更小的小颗粒, 使其悬浮在先前大颗粒之上, 先前大颗粒在新投入小颗粒下方离子尾场的吸引作用下使其悬浮位置升高, 其运输方向由先前的逆流反转变为正流. (2) 通过人为降低颗粒高度使其发生从正流到逆流的反转. 首先通过控制放电条件将颗粒的平衡高度调节到较高位置, 颗粒形成持续的正流(图 6(b)). 进一步利

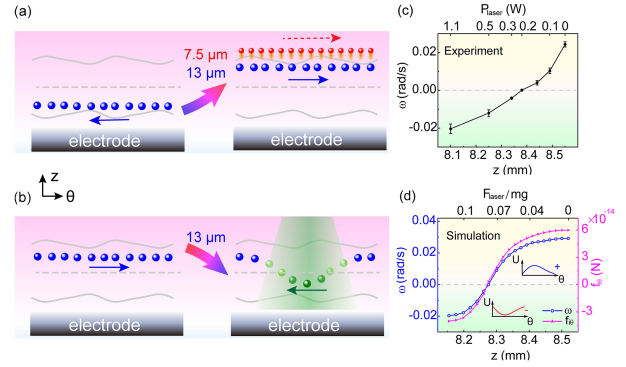


图 6 (网络版彩图)与颗粒竖直悬浮高度相关的水平运输机制的实验验证^[44]. (a), (b) 高度可调颗粒链的水平流反转; (c), (d) 颗粒链平均角速度 ω 与悬浮高度 z 的关系

Figure 6 (Color online) Experimental verification of the height-modulating horizontal transport of dust particles in a dusty plasma ratchet [44]. (a), (b) Height-modulating horizontal flow reversal of the particle chain; (c), (d) the relationship between average angular velocity ω of the dust chain and its suspended height z .

用激光辐射压力竖直向下照射颗粒来降低其悬浮高度, 使其受到的棘轮势的不对称取向反转, 颗粒流由正流反转为逆流. 通过逐渐增加激光强度使颗粒悬浮高度由高到低连续地降低, 颗粒流将由正流逐渐变为 0, 并进一步反转为逆流(图 6(c)和(d)).

尘埃等离子体棘轮中的颗粒运输也可以利用唯象的方法来研究^[45]. 通过给带电颗粒施加一个零偏置的周期性外加驱动力, 利用 Langevin 方程研究颗粒在棘轮势中的运输机制, 这在本质上是一个全新的强耦合摇摆棘轮系统. 零偏置的周期性驱动使系统处于非平衡态, 棘轮势为颗粒整流提供不对称性条件. 通过调节驱动力大小或棘轮势阱深, 不仅可以控制颗粒流大小, 还能改变颗粒流方向. 根据唯象的数值研究结果, 将来有望在实验上实现尘埃等离子体摇摆棘轮中颗粒运输的调控.

4 尘埃等离子体棘轮在颗粒分离中的应用

基于颗粒悬浮高度相关的水平运输机制, 可以利用尘埃等离子体棘轮实现双分散颗粒分离. 由于两种不同尺寸颗粒在鞘层中的悬浮高度不同, 从理论上讲, 只要两种颗粒的运输速度不一样就可以实现颗粒分离, 但从分离效果和实际操作的方便性来讲, 通过设计直条形棘轮通道使两种颗粒沿相反方向运输能够达

到更理想的颗粒分离效果^[46].

从结构上来说, 只需要简单地将圆形棘轮(图 1)拉直就可以设计出直条形棘轮(图 7(a))^[47], 同时在锯齿通道两端设置收集槽用来收集分离后的颗粒. 在实验中, 将两种不同尺寸的颗粒混合物由锯齿通道中部投入到通道内, 它们将悬浮于通道中不同的平衡高度上. 通过调节放电功率与压强控制它们的悬浮高度, 使其各自受到的棘轮势的不对称取向相反, 因此, 这两种颗粒在锯齿通道内将沿相反的方向分别向通道两端的出口运输并进入各自的收集槽进行收集(图 7(b)).

在颗粒分离过程中, 两种不同尺寸的颗粒悬浮在鞘层中不同的高度上, 因此, 悬浮于高处的小颗粒下方的离子尾场可能会影响悬浮于低处的大颗粒的运输, 这对双分散颗粒的分离度有一定的影响. 实验表明, 当双分散颗粒的半径差大于 $2.5\ \mu\text{m}$ 时, 它们的混合物在进入锯齿通道后, 小颗粒向右运输, 大颗粒向左运输, 能够实现理想的颗粒分离, 分离纯度达到100% (图 8)^[47]. 当双分散颗粒的半径差小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 时, 分离纯度会有所降低.

5 总结与展望

尘埃等离子体与费曼棘轮这两个不同的学科已经历了30多年的相关研究, 只有近些年学界才将这两个学科进行交叉融合, 开展了一系列实验与理论研究. 一

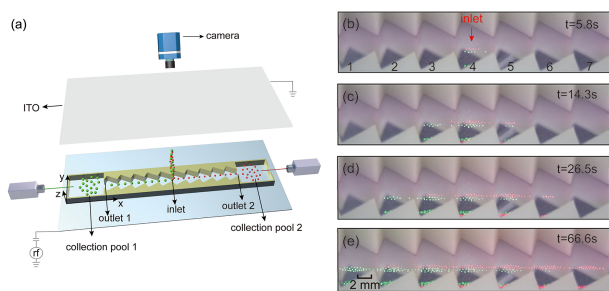


图 7 (网络版彩图)尘埃等离子体直棘轮中的颗粒分离^[47]. (a) 双分散颗粒分离示意图; (b)–(e) 颗粒分离实验

Figure 7 (Color online) Particle separation in a straight dusty plasma ratchet^[47]. (a) Sketch of the bi-dispersed particle separation; (b)–(e) particle separation experiments.

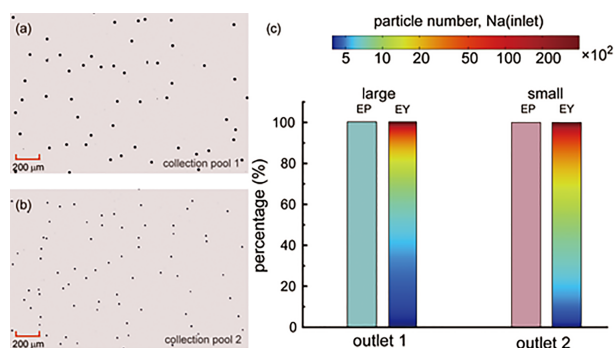


图 8 (网络版彩图)双分散颗粒分离效果^[47]. (a), (b) 收集大小颗粒显微示意图; (c) 分离度和产率

Figure 8 (Color online) Separation effect of bi-dispersed dust particles^[47]. (a), (b) Micrograph showing of the gathered large and small particles; (c) separation purity and yield.

方面, 利用尘埃等离子体的特性将费曼棘轮的研究拓展到了弱阻尼强耦合范畴, 另一方面, 利用费曼棘轮原理实现了对等离子体中尘埃颗粒的有效调控, 并且能够利用设计的尘埃等离子体棘轮实现双分散微米颗粒分离, 且分离效果非常理想, 为颗粒分离领域提供了一种新思路与新方法.

尘埃等离子体棘轮中颗粒整流与流的反转来源于锯齿通道的不规则性. 这种与悬浮高度有关的水平运输机制也适用于其他具有不规则结构的鞘层, 因此, 可以解释诸如晶圆上方的尘埃云等具有不规则鞘层情形下的颗粒运输现象.

尘埃等离子体棘轮中的不对称性可以来自两侧的锯齿结构, 也可以通过设计锯齿形下极板来构建. 利用两侧型锯齿构造出的锯齿通道能够容纳的颗粒数有限, 适合实验室实验研究以发现一些新现象与新机制. 例如, 将来可以在直棘轮中通过给单个或多个颗粒施加激光外场来周期性驱动颗粒, 进而研究惯性颗粒在摇摆棘轮中的运输机制. 还可以构建阵列电极或光敏电极, 通过给电极施加开关电压或光照来形成开关棘轮势, 进而研究惯性颗粒在开关棘轮中的运输. 对于需要分离大量颗粒的实际应用场景, 将来可以设计锯齿形下极板分离装置以容纳足够多的颗粒使其分别反向运输, 这样既能保证理想的分离纯度, 又具有较高的分离产量与效率.

参考文献

- 1 Morfill G E, Ivlev A V. Complex plasmas: An interdisciplinary research field. *Rev Mod Phys*, 2009, 81: 1353–1404

- 2 Shukla P K, Eliasson B. *Colloquium: Fundamentals of dust-plasma interactions*. [Rev Mod Phys](#), 2009, 81: 25–44
- 3 Du C R, Nosenko V, Thomas H M, et al. Slow dynamics in a quasi-two-dimensional binary complex plasma. [Phys Rev Lett](#), 2019, 123: 185002
- 4 Huang D, Baggioli M, Lu S, et al. Revealing the supercritical dynamics of dusty plasmas and their liquidlike to gaslike dynamical crossover. [Phys Rev Res](#), 2023, 5: 013149
- 5 Wieben F, Block D. Entropy measurement in strongly coupled complex plasmas. [Phys Rev Lett](#), 2019, 123: 225001
- 6 Shi P, Wang D. Numerical simulation of pulsed corona discharge with dust particles at atmospheric pressure. [Phys Plasmas](#), 2005, 12: 043505
- 7 Wang W, Hu H W, I L. Surface-induced layering of quenched 3D dusty plasma liquids: Micromotion and structural rearrangement. [Phys Rev Lett](#), 2020, 124: 165001
- 8 Zhang Y, Wang X, Liu J. Formation of a cylindrical dust void in a plasma crystal due to a potential bump. [Phys Rev E](#), 2008, 78: 016405
- 9 Hou X N, Liu Y H, Kravchenko O V, et al. Structures and dynamics in a two-dimensional dipolar dust particle system. [Phys Plasmas](#), 2018, 25: 053701
- 10 Wong C S, Goree J, Haralson Z, et al. Strongly coupled plasmas obey the fluctuation theorem for entropy production. [Nat Phys](#), 2018, 14: 21–24
- 11 Liu X M, Song Y H, Xu X, et al. Simulation of dust particles in dual-frequency capacitively coupled silane discharges. [Phys Rev E](#), 2010, 81: 016405
- 12 Haralson Z, Goree J. Overestimation of viscosity by the Green-Kubo method in a dusty plasma experiment. [Phys Rev Lett](#), 2017, 118: 195001
- 13 Zhang H, Yang Y, Hong X R, et al. Freak oscillation in a dusty plasma. [Phys Rev E](#), 2017, 95: 053207
- 14 Wang Y, Chen Z, Guan M, et al. External-field driven motion of charged grains in magnetized plasma. [Phys Lett A](#), 2021, 406: 127451
- 15 Joshi E, Pustynnik M Y, Thoma M H, et al. Recrystallization in string-fluid complex plasmas. [Phys Rev Res](#), 2023, 5: L012030
- 16 Yang F, Kong W, Liu S F, et al. Dynamics of two-dimensional binary dusty plasma in liquid-like state. [Phys Plasmas](#), 2020, 27: 113702
- 17 Hartmann P, Sándor M C, Kovács A, et al. Static and dynamic shear viscosity of a single-layer complex plasma. [Phys Rev E](#), 2011, 84: 016404
- 18 Huang F, Ye M, Wang L, et al. Observation of vortex patterns in a magnetized dusty plasma system. [Plasma Sci Technol](#), 2007, 9: 11–14
- 19 Bockwoldt T, Arp O, Menzel K O, et al. On the origin of dust vortices in complex plasmas under microgravity conditions. [Phys Plasmas](#), 2014, 21: 103703
- 20 Choudhary M, Mukherjee S, Bandyopadhyay P. Experimental observation of self excited co-rotating multiple vortices in a dusty plasma with inhomogeneous plasma background. [Phys Plasmas](#), 2017, 24: 033703
- 21 Arzola A V, Volke-Sepúlveda K, Mateos J L. Experimental control of transport and current reversals in a deterministic optical rocking ratchet. [Phys Rev Lett](#), 2011, 106: 168104
- 22 Lundh E, Wallin M. Ratchet effect for cold atoms in an optical lattice. [Phys Rev Lett](#), 2005, 94: 110603
- 23 Grossert C, Leder M, Denisov S, et al. Experimental control of transport resonances in a coherent quantum rocking ratchet. [Nat Commun](#), 2016, 7: 10440
- 24 Roeling E M, Germs W C, Smalbrugge B, et al. Organic electronic ratchets doing work. [Nat Mater](#), 2010, 10: 51–55
- 25 Feynman R P, Leighton R B, Sands M. *The Feynman Lectures on Physics Vol I*. Reading: Addison Wesley, 1963
- 26 Hänggi P, Marchesoni F. Artificial Brownian motors: Controlling transport on the nanoscale. [Rev Mod Phys](#), 2009, 81: 387–442
- 27 Ezber Y, Belyy V, Can S, et al. Dynein harnesses active fluctuations of microtubules for faster movement. [Nat Phys](#), 2020, 16: 312–316
- 28 Schwemmer C, Fringes S, Duerig U, et al. Experimental observation of current reversal in a rocking Brownian motor. [Phys Rev Lett](#), 2018, 121: 104102
- 29 de Souza Silva C C, van de Vondel J, Morelle M, et al. Controlled multiple reversals of a ratchet effect. [Nature](#), 2006, 440: 651–654
- 30 Mukhopadhyay A K, Liebchen B, Schmelcher P. Simultaneous control of multispecies particle transport and segregation in driven lattices. [Phys Rev Lett](#), 2018, 120: 218002
- 31 Tang H, Niu J, Jin H, et al. Geometric structure design of passive label-free microfluidic systems for biological micro-object separation. [Microsyst Nanoeng](#), 2022, 8: 62
- 32 Skaug M J, Schwemmer C, Fringes S, et al. Nanofluidic rocking Brownian motors. [Science](#), 2018, 359: 1505–1508
- 33 He Y, Ai B, Dai C, et al. Experimental demonstration of a dusty plasma ratchet rectification and its reversal. [Phys Rev Lett](#), 2020, 124: 075001
- 34 Cai Y W, Tian M, Ma Z B, et al. Rectification experiments and 3D simulations in a dusty plasma ratchet (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2022, 52: 295212 [蔡雅文, 田淼, 马宗博, 等. 尘埃等离子体棘轮整流实验与三维模拟. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 295212]
- 35 Cai Y W, Ma Z B, Cai Z M, et al. Study on the dust vortex in a dusty plasma ratchet (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2024, 54: 235212 [蔡雅文, 马宗博, 才志民, 等. 尘埃等离子体棘轮中尘埃涡流研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 235212]
- 36 Dinis L, González E M, Anguita J V, et al. Lattice effects and current reversal in superconducting ratchets. [New J Phys](#), 2007, 9: 366
- 37 Dai C X, Song C, Zhou Z X, et al. Directional motion of dust particles at different gear structures in a plasma. [Chin Phys B](#), 2020, 29: 025203

- 38 Song C, Dai C X, Wang R Q, et al. Motion of dielectric particles in dust plasma metal ratchet (in Chinese). J Hebei Univ (Nat Sci Ed), 2020, 40: 7–11 [宋超, 戴超星, 王瑞琦, 等. 介质颗粒在尘埃等离子体金属棘轮中的运动. 河北大学学报(自然科学版), 2020, 40: 7–11]
- 39 Song C. Particle Motion in A Dusty Plasma Metal Ratchet (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Baoding: University of Hebei, 2020 [宋超. 尘埃等离子体金属棘轮中的颗粒运动. 硕士学位论文. 保定: 河北大学, 2020]
- 40 Dai C, Song C, Guo X, et al. Rotation of dust vortex in a metal saw structure in dusty plasma. *Plasma Sci Technol*, 2020, 22: 034008
- 41 Yan J, Feng F, Liu F, et al. Formation and dissociation of dust molecules in dusty plasma. *Chin Phys B*, 2016, 25: 095202
- 42 Zhang S X, Wang S, Zhang N, et al. Distribution of dusty plasma particles on an asymmetrical electrode (in Chinese). J Hebei Univ (Nat Sci Ed), 2023, 43: 133–138 [张顺欣, 王硕, 张宁, 等. 不对称电极上尘埃等离子体颗粒的分布. 河北大学学报(自然科学版), 2023, 43: 133–138]
- 43 Wang S, Zhang N, Zhang S X, et al. Quantitative simulations of ratchet potential in a dusty plasma ratchet. *Chin Phys B*, 2022, 31: 065202
- 44 Zhang S, Wang S, Yao T, et al. Height-modulating horizontal transport of dust particles in a dusty plasma ratchet. *Plasma Sources Sci Technol*, 2024, 33: 055008
- 45 Li W, Huang D, Reichhardt C, et al. Bidirectional flow of two-dimensional dusty plasma under asymmetric periodic substrates driven by unbiased external excitations. *Phys Rev Res*, 2023, 5: 023008
- 46 Tian M, Yao T Y, Cai Z M, et al. Three-dimensional numerical simulation of particle separation using a dusty plasma ratchet (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2024, 73: 193–200 [田淼, 姚廷昱, 才志民, 等. 尘埃等离子体棘轮中颗粒分离的三维模拟. 物理学报, 2024, 73: 193–200]
- 47 Cai Z M, Ma Z B, Zhao Y K, et al. Separating micrometer-sized particles utilizing a dusty plasma ratchet. *Appl Phys Lett*, 2023, 123: 194102

Particle transport in dusty plasma ratchet structure

HE YaFeng^{1,2,3*}, LIU FuCheng^{1,3} & FAN WeiLi^{1,2}

¹College of Physical Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China

²Hebei Research Center of the Basic Discipline for Computational Physics, Baoding 071002, China

³Hebei Key Laboratory of High-Precision Computation and Application of Quantum Field Theory, Baoding 071002, China

*Corresponding author (email: heyf@hbu.edu.cn)

Dusty plasmas and Feynman ratchets belong to two distinct fields of study. In dusty plasmas, charged particles can form a strongly coupled and weakly damped subsystem, exhibiting transport phenomena such as shear flow and vortices due to internal instabilities or external field control. Feynman ratchets, with their inherent asymmetry, can rectify random perturbations in non-equilibrium environments into directed particle transport. By adjusting experimental conditions, particle transport can be variously controlled. However, previous studies on particle transport in Feynman ratchets have been limited to overdamped and weakly coupled cases. By integrating the two disciplines of dusty plasma and the Feynman ratchet, a dusty plasma ratchet device can be designed. This approach not only offers a new method for effectively controlling charged particles in dusty plasmas but also extends the study of Feynman ratchets to the realm of strongly coupled and weakly damped systems. This study reviews recent experimental phenomena and rectification mechanisms of particle transport in dusty plasma ratchets, as well as their applications in particle separation.

dusty plasma, particle transport, Feynman ratchet, rectification, particle separation

PACS: 52.27.Lw, 52.25.Fi, 52.77.-j, 73.40.Ei, 64.75.Xc

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0345](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0345)