

文章编号: 1671-7449(2026)01-0072-07

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(1): 72-78.

正电子发射粒子示踪技术的物理基础与误差来源

李 坤^{1,2}, 车汉桥³, 潘毅华², 刘 宾¹, 陈 平^{1*}, 潘晋孝^{1,2}, 韩 焱^{1,2}

(1. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 智能探测技术与装备山西省重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 广西大学 机械工程学院, 广西 南宁 530004)

摘 要: 正电子发射粒子示踪(Positron Emission Particle Tracking, PEPT)技术是一种面向工业过程中复杂多相流的新型无损测量技术, 通过对各种液体、粉末和颗粒系统进行三维动力学成像, 能够提供高时空分辨率(毫秒级和毫米级)的粒子运动轨迹。首先, 从正电子发射、正电子探测和粒子示踪3个方面详细阐述了PEPT技术的物理基础和工作原理; 然后, 深入分析了PEPT技术中的各种误差来源, 包括虚假符合响应线、正电子飞行范围、探测器的固有空间分辨率和探测速率、示踪粒子运动等对PEPT技术的影响机制和应对措施。旨在为PEPT实际应用中示踪粒子制备、PEPT测量实验设置、PEPT算法参数选择等提供一定的参考依据。

关键词: 正电子发射; 正电子探测; 粒子示踪; 正电子发射粒子示踪; 动态轨迹测量

中图分类号: TL812

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026028

引用格式: 李坤, 车汉桥, 潘毅华, 等. 正电子发射粒子示踪技术的物理基础与误差来源[J]. 测试技术学报, 2026, 40(1): 72-78.

LI Kun, CHE Hanqiao, PAN Yihua, et al. Physical principles and error sources of positron emission particle tracking[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(1): 72-78.

Physical Principles and Error Sources of Positron Emission Particle Tracking

LI Kun^{1,2}, CHE Hanqiao³, PAN Yihua², LIU Bin¹, CHEN Ping^{1*}, PAN Jinxiao^{1,2}, HAN Yan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Intelligent Detection Technology & Equipment, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Positron emission particle tracking (PEPT) is a novel non-invasive and non-destructive measurement technique for complex multiphase flows in industrial processes. It provides a high spatial-temporal ($\sim$ ms and $\sim$ mm) particle dynamic trajectory via the three-dimensional dynamic imaging of various liquid, powder, and particle systems. The physical principles of the PEPT technique are firstly illustrated from three aspects: positron emission, positron detection, and particle tracking. Then, the error sources in PEPT are deeply analyzed, including the influence mechanisms and countermeasures of factors such as false coincidences in LoR,

【收稿日期】2025-07-03

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(U23A20285, 52406199); 中国博士后科学基金资助项目(2025M772901, 2024M752994); 山西省重点研发计划资助项目(202302150401011); 山西省基础研究计划资助项目(202303021222095, 202403021212340); 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室开放基金(2024-SYSJJ-03); 信息探测与处理山西省重点实验室开放基金(2023-006)

【作者简介】李 坤(1990—), 男, 讲师, 博士, 主要从事信息探测与处理、多相流测量技术研究。E-mail: likun@nuc.edu.cn.

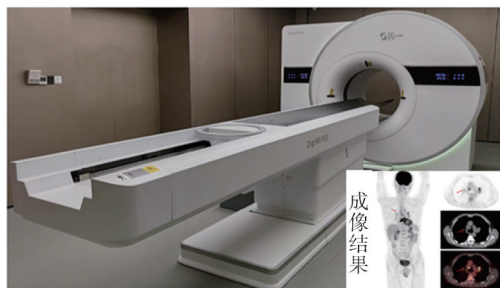
*【通信作者】陈 平(1983—), 男, 教授, 博士, 主要从事信号与信息处理、图像处理与重建等研究。E-mail: pc0912@163.com.

positron flight range, inherent spatial resolution and detection rate of the detector, and tracer particle motion. A guidance for practical PEPT applications is offered in this work, such as PEPT tracer preparation, PEPT measurement setup, and parameter selection of PEPT algorithm.

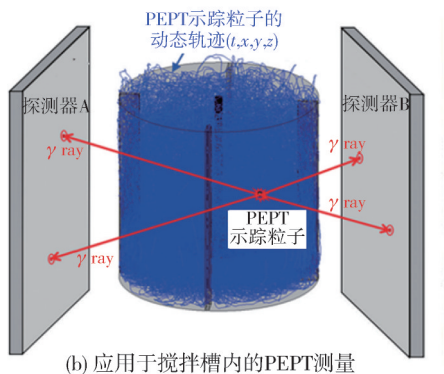
Key words: positron emission; positron detection; particle tracking; positron emission particle tracking (PEPT); dynamic trajectory measurement

0 引言

正电子发射断层成像 (Positron Emission Tomography, PET) 是一种先进的医学成像技术, 可以直接观察体内的生理和生化过程, 广泛应用于癌症、心血管疾病和神经系统疾病的基础研究、早期诊断、治疗和药物开发。采用放射性核素标记葡萄糖、蛋白质等参与生命代谢的物质, 并将其作为示踪剂注入人体, 通过 PET 算法对代谢过程中这些示踪剂在体内的累积浓度(空间分布)进行成像, 并以此来反映生命的代谢活动^[1-2]。作为医用 PET 的一种变体, 正电子发射粒子示踪 (Positron Emission Particle Tracking, PEPT) 技术使用放射性核素标记代表性的颗粒, 并将其作为示踪粒子引入流体系统, 通过 PEPT 算法动态追踪颗粒运动过程来实现流体动力学测量^[3-5]。PEPT 和 PET 的典型应用如图 1 所示, 二者之间存在两个根本区别: 放射性示踪剂和算法。



(a) PET系统与人体成像结果



(b) 应用于搅拌槽内的PEPT测量

图 1 PET与PEPT的典型应用

Fig. 1 Typical applications of PET and PEPT

PEPT 示踪剂是将放射性核素标记到代表性颗粒上制成的, 即放射性核素聚集在离散点上, 而 PET 示踪剂一般是含放射性核素标记物的水溶液, 放射性核素可以自由扩散并参与代谢过程。PEPT 算法根据极短时间(毫秒级)内的探测数据对示踪粒子进行空间定位, 获得示踪粒子的动态轨迹; 而 PET 一般根据一段时间(分钟级)内的探测数据重建体内放射性分布图像, 获得体内代谢活动信息。

PEPT 技术主要由示踪粒子、硬件探测器和 PEPT 算法三部分组成^[6]。示踪粒子内的放射性核素极不稳定, 容易发生正电子发射和正电子湮灭事件, 并向外辐射 γ 光子; 随后, 成对的 γ 射线被探测器捕获并被记录为响应线 (Line of Response, LoR) 数据; 最后, PEPT 算法将若干条 LoR 数据转化为示踪粒子的空间位置。由于 γ 光子具有高能量、高穿透性、不带电荷等特点, 可以穿透混凝土、钢材等致密材料, 且不受电场和磁场的影响, 因此, PEPT 在非透明复杂多相流测量方面具有独特的优势。PEPT 能够对示踪粒子进行毫米级、毫秒级的动态定位, 与激光多普勒测速仪或粒子图像测速仪等先进光学测量技术具有近似精度, 但克服了这种光学测量技术对光学路径依赖问题, 已被广泛应用于各种液体、粉末和颗粒的动力学测量, 涉及流化、搅拌混合、旋风分离、研磨、铸造、挤出造粒、厌氧发酵等大量工业过程^[6-10]。

在理想情况下, 如果 γ 射线都来自于示踪粒子的位置, 且被准确捕获, 那么可以通过求解两对 γ 射线的交点来获得示踪粒子的准确位置。然而, PEPT 的实际应用过程中存在很多误差来源, 比如虚假符合的 γ 射线对、正电子飞行范围、探测器的固有空间分辨率、探测器最大探测速率、示踪粒子的运动等。尽管 PEPT 技术已经在各领域得到广泛应用, 但其误差来源及其适用性尚未进行系统性分析。本文首先对 PEPT 技术及其物理基础进行了概述, 然后具体分析了 PEPT 技术中的误差来源, 为实际适用工况选择、示踪粒子制备、PEPT 测量实验设置、PEPT 数据后处理与结果分析等操作提供一定的理论指导。

1 PEPT基本原理

本节重点描述PEPT 3个主要组成部分的实现过程,即正电子发射的示踪粒子、正电子探测的硬件探测器、粒子示踪的PEPT算法。

1.1 正电子发射

对于一个典型的颗粒系统,如果采用PEPT技术对其内部颗粒动力学进行测量,就需要一个能够发射正电子的示踪粒子,然后通过探测该粒子发射的 γ 射线对其进行示踪。首先,选用合适

的放射性同位素对代表性颗粒进行标记,使其可以产生具有适当放射性的示踪粒子。如图2(a)所示,以 ^{18}F 标记玻璃颗粒的过程为例,将一个玻璃颗粒放置在回旋加速器发出的高能 ^3He 束的路径上,一段时间后即可将物质内少量的 ^{16}O 转化为 ^{18}F ,对应的核反应为 $^{16}\text{O}(^3\text{He},\text{p})^{18}\text{F}$ ^[11]。这就是典型的示踪粒子的放射性标记过程,颗粒物理特性不会发生任何显著变化,即PEPT示踪粒子与系统内其他颗粒具有一致的动力学特性。常用的放射性核素有 ^{18}F 、 ^{11}C 、 ^{68}Ga 和 ^{82}Rb 等,在实际应用中根据被标记颗粒的材料特性进行选取。

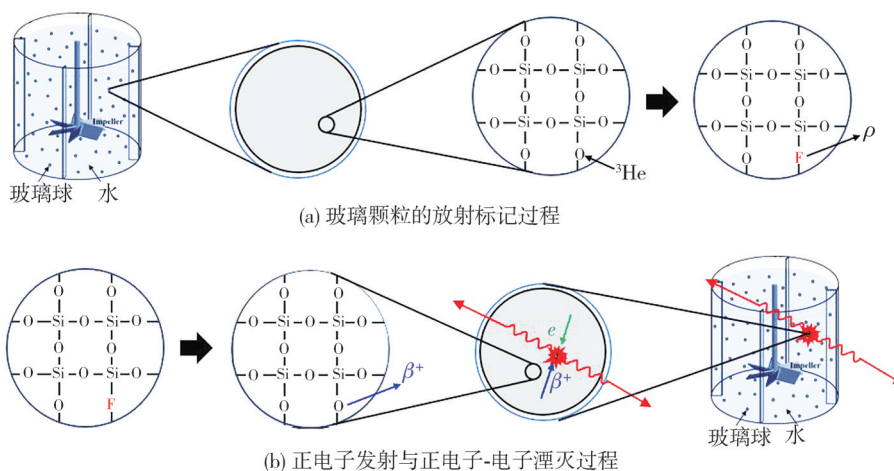


图2 示踪粒子的放射标记与正电子发射过程

Fig. 2 Radiolabeling of tracer particles and positron emission process

由于放射性核素极不稳定,会发生核衰变,原子核内发生质子-中子转换,并辐射出一个正电子和中微子($\text{p}^+ \rightarrow \text{n} + \beta^+ + \nu$);伴随着正电子-电子湮灭事件发生,生成2个 γ 光子($\beta^+ + \text{e}^- \rightarrow 2\gamma$)。如图2(b)所示,以半衰期为110 min的 ^{18}F 为例, ^{18}F 原子衰变为 ^{18}O ,并发射出正电子。在相对致密的介质中,发射的正电子在与电子碰撞之前只会移动很短的距离^[12],而且与任何粒子和反粒子的碰撞一样,正电子和电子将发生湮灭,将它们的质量转化为2个511 keV光子形式的能量,其运动轨迹方向相反,近似共线。

1.2 正电子探测

PEPT硬件探测器主要作用是捕获正电子-电子湮灭辐射出的 γ 光子对,并记录相应的捕获时间和空间信息用于重构LoR。探测器一般由前端闪烁晶体阵列、光电倍增管、耦合的电子学电路、符合处理器组成。当光子射入闪烁体后,引起闪烁体原子电离激发并产生可见光波段闪烁光子,

经反射、透射等传输至光电倍增管转换为光电子,光电子逐级倍增形成输出信号,随后被电子学电路读出并提取 γ 光子的探测时间和能量信息。如果两个光子在同一个纳秒级的时间窗内被捕获,符合处理器则判定这两个光子来自于同一个正电子-电子湮灭事件,并储存其时间和空间位置信息,即被记录为一条LoR。

1.3 粒子示踪

将前述放射性核素标记的示踪粒子引入待测系统内,并将其置于PEPT探测器视场内,示踪粒子的运动可以描述待测系统中的颗粒流动过程,示踪粒子将不断向外辐射 γ 光子对,如图3(a)所示,这2个 γ 光子遵循共线、反向的运动轨迹。换句话说,这2个 γ 光子与探测器相互作用位置的连线(LoR,图3(b))必须穿过正电子-电子湮灭事件发生的位置,即穿过(或非常接近)示踪粒子位置。在理想情况下,根据两条LoRs的解析方程可以从数学上准确求解LoRs的交点,交点位置即为示踪粒子的准确位置,如图

3(c)所示。然而,由于存在康普顿散射、环境辐射和随机符合噪声等影响,部分LoRs并非严格穿过示踪粒子位置,甚至完全偏离,因此,实际PEPT算法通常需要50条以上LoRs进行示踪粒子定位^[3,7,12]。

如果示踪粒子具有足够的活性,即每秒发射足够多的正电子,可以通过LoRs数据切分来实现对示踪粒子的连续定位,获得其在三维空间中的运动轨迹。

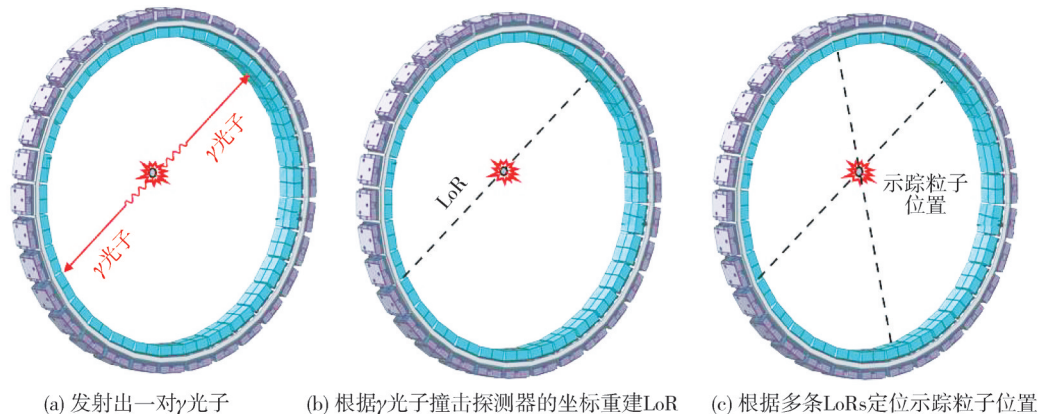


图3 理想情况下PEPT定位静态示踪粒子的示意图

Fig. 3 Illustration of PEPT locating static tracer under ideal conditions

2 误差来源

上一节主要描述了理想情况下的PEPT物理基础,但在PEPT实际应用中存在虚假符合、正电子飞行范围、探测器的空间和时间分辨率、示踪粒子运动等因素的影响。本节重点分析上述因素对PEPT技术的影响机制,并指出如何最大程度上降低其在实际应用中的影响,准确地测量示踪粒子的动态运动过程。

2.1 虚假符合响应线

由于PEPT探测器对LoR的捕获机制是基于理想情况下的假设:在同一个纳秒级符合时间窗内捕获的两个γ光子来自于同一个正电子-电子湮灭事件,且在探测器上的两个捕获点的连线经过示踪粒子的位置,即真实的LoR,如图4(a)所示。

然而,实际PEPT探测器可能将两个无关的或非共线的γ光子错误记录,其对应的LoR也不会穿过示踪粒子所在位置。

如果使用很高活度的放射性源,那么极有可能在符合时间窗内发生两次湮灭事件,且每对中只有一个光子与探测器相互作用,此时探测器将把这两个探测点的连线记录为一个错误LoR,如图4(b)所示。

如果正电子湮灭事件释放的γ光子中有一个或两个发生了康普顿散射,这就意味着γ光子对的轨迹不再共线,但是探测器仍会将这两个探测点的连线记录为一个错误的LoR,如图4(c)所示。此外,在环境中也可能存在两个与实验完全无关的γ光子在符合时间窗口内恰好与探测器相互作用,探测器也会将这两个探测点的连线记录为一个错误的LoR,如图4(d)所示。

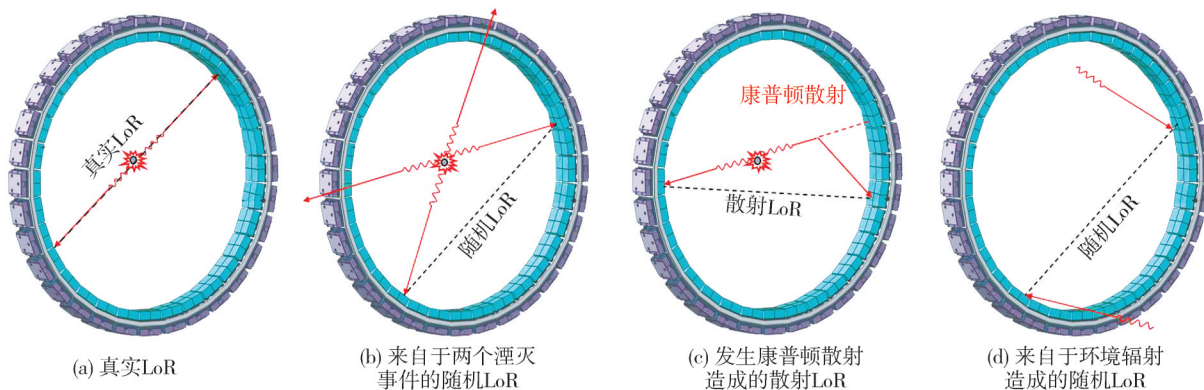


图4 PEPT探测器捕获的LoR的类型

Fig. 4 Types of line of response captured by PEPT detector

2.2 正电子飞行范围

PEPT技术的第2个假设是：所有 γ 光子对都是从示踪粒子中心发射出来的，即任何一条真正的LoR都穿过示踪粒子的位置，这意味着可以通过求解任何两个LoR的交点获得示踪粒子的位置。然而，正电子在从示踪粒子中发射出去后，会向周围飞行一定的距离再与遇到的电子发生正电子-电子湮灭事件，这就导致光子对的实际发射位置与示踪粒子的真实位置之间存在一定偏差，如图5所示。正电子飞行距离与示踪粒子所在空间的介质电子密度、介质原子序数和选用的放射性核素有关。

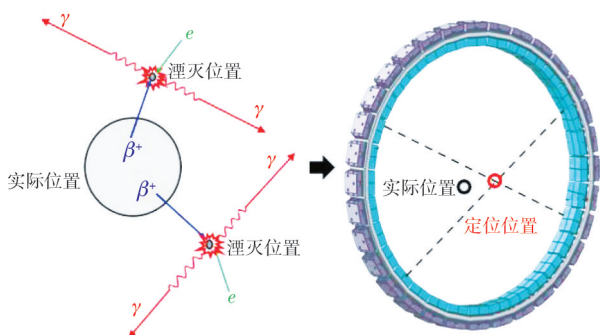


图5 正电子飞行范围造成的定位偏差

Fig. 5 Location error from positron flight range

在空气或非常低密度的材料中，介质中电子密度较低，正电子与电子碰撞概率较小，能量损失较慢，正电子飞行距离相对较大；在高原子序数的材料中，对正电子的阻止本领更强，可以通过电离和辐射损失更快耗散能量，缩短正电子飞行距离。反之，在高密度或原子序数较高的材料中，正电子飞行距离相对较小。因此，PEPT实际应用应尽可能在相对致密的介质环境中进行，在相对低密度介质中应尽量使用相对致密的材料，在颗粒内部进行放射性标记的方法制备体积较大的示踪粒子。需要注意的是，虽然相对致密的金属材料会造成比较严重的康普顿散射，但一般能获得比空气中更好的定位精度。此外，不同的放射性核素发射出的正电子能量谱不同，正电子发射的初始动能越高，需要通过多次碰撞损失能量后才能与电子湮灭，导致正电子飞行距离越长^[13-15]。比如，由于正电子发射的初始动能 $^{82}\text{Rb} > ^{68}\text{Ga} > ^{18}\text{F}$ ^[16]，对应的正电子飞行范围为 $^{82}\text{Rb} > ^{68}\text{Ga} > ^{18}\text{F}$ ，因此，选用 ^{18}F 作为放射性核素对示踪粒子进行放射性标记是一个不错的选择。

2.3 探测器的固有空间分辨率

为了有效地进行PEPT定位，需要硬件探测器能够高效、准确地检测单个 γ 光子，并且能够精确地进行符合匹配。实际上，所有PEPT探测器的空间分辨率都是有限的，即 γ 光子与探测器表面碰撞的实际位置 (X, Y) 可能在记录时存在一定的误差 $(X \pm \sigma_x, Y \pm \sigma_y)$ 。假设在 X 和 Y 两个方向上的分辨率相同，那么在 (X, Y) 处与探测器相互作用的位置可能会被记录为以 (X, Y) 为中心、直径为 $2\sigma_x$ 范围内的任意位置，即LoR对应于空间上的一个响应线圆柱，如图6所示，这就在示踪粒子位置上引入了一个潜在误差。值得注意的是，有些 γ 光子并不是在探测器表面被探测到，可能在一定程度上穿透探测器晶体后被探测到，进一步增加了额外的误差源，这种影响可以被看作进一步扩大了响应线圆柱的半径。

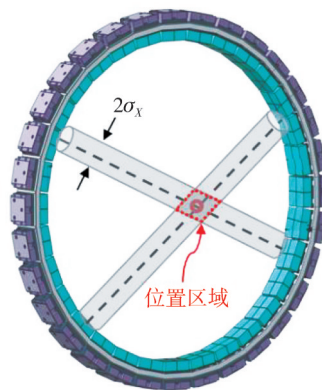


图6 探测器固有空间分辨率造成的定位偏差

Fig. 6 Location error from inherent spatial resolution of detector

2.4 探测器的探测速率

不仅PEPT探测器在空间分辨率上存在探测误差，在时间分辨率上也不是绝对理想的。探测速率表示单位时间可以检测到LoR的数量，可以进一步推算PEPT的定位速率，这主要取决于示踪粒子的放射性活度、PEPT探测器效率和视场范围。对于一个放射性活度为 A 的示踪粒子，将其置于立体角为 Ω ，探测效率为 ϵ 的探测器视场内，单位时间内可以检测到单个 γ 光子的数量为 $R_s = \frac{2A\epsilon\Omega}{4\pi}$ 。对于给定的理想探测器，较高的示踪粒子活度能够获得较高的单光子探测速率。然而，实际探测器在给定时间段内可以记录的光子数量也存在限制，这主要是由探测器本身的“死区时间”、配套电子设备的最大

数据处理和存储速率决定的^[11]。过高的放射性活度有可能使探测器被光子“致盲”，并不能取得对应的有效数据探测速率。同时，固定大小的示踪粒子一般只能包含有限的放射性核素，因此其最高活度是存在上限的。此外，适当增加探测器晶体数量、调整探测单元的空间几何分布可以增大有效探测视场范围，进而获得更多LoRs。

2.5 示踪粒子运动误差

对于静态示踪粒子来说， γ 射线都是从示踪粒子位置发出，因此，探测器的时间分辨率对PEPT定位结果并没有什么影响，只要保证积累到足够的LoRs即可确定示踪粒子的准确位置^[3,7]，如图7(a)所示。然而，大多数PEPT定位算法都是基于所有 γ 射线都

来自静止点状源的假设下工作的。对于移动的示踪粒子来说，采集到的LoRs并不是对应示踪粒子的初始位置，而是对应于采集期间的运动轨迹，因此这个假设不再成立。但是，如果探测器的探测速率较高，且示踪粒子运动速度较慢，在极短时间内LoRs对应的运动轨迹非常短，可以近似看作直线，那么可以将运动轨迹的中点近似表示示踪粒子的平均位置，如图7(b)所示。显而易见，如果运动轨迹很长，且运动轨迹复杂，那么这种近似将无法准确表征示踪粒子的运动过程，如图7(c)所示。在实际应用中，绝大多数示踪粒子都是运动的，因此，在使用PEPT算法进行定位时要选择合适的参数，尽量平衡系统的定位误差和示踪粒子运动误差，保持PEPT定位结果的不确定性和运动轨迹长度在同一个尺度下。

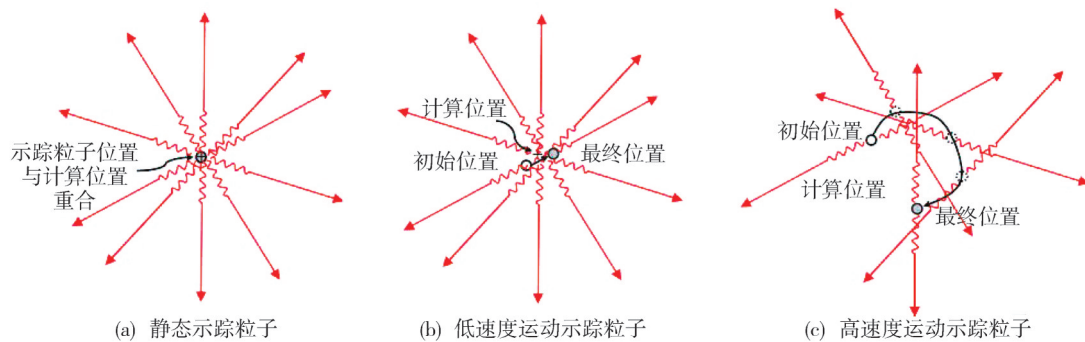


图7 示踪粒子运动引起的定位误差

Fig. 7 Location error from particle motion

3 结论

PEPT是一种面向工业过程中复杂多相流的新型无损的测量技术，能够对示踪粒子进行毫秒级和毫米级的动态轨迹测量，可以实现对各种液体和固体组成的多相流系统进行三维动力学成像。本文首先从正电子发射、正电子探测和粒子示踪的物理基础方面详细阐述了PEPT技术的工作原理。然后，对PEPT的各种误差来源进行了详细分析，包括虚假符合响应线、正电子飞行范围、探测器的固有空间分辨率和探测速率、示踪粒子运动等，并分析了上述误差来源的影响机制和应对措施。PEPT实际测量应尽可能在相对致密的介质环境中进行；选择正电子飞行范围较小的放射性核素去标记示踪粒子；在设计PEPT测量实验时，根据探测器的探测性能合理选择示踪粒子的活度；通过合理平衡系统的定位误差和示踪粒子运动误差，来确定PEPT算法中的关键参数选取。本文通过系统性地梳理PEPT物理基

础与定位误差来源，构建了面向PEPT技术初学者和使用者的分析框架，为PEPT测量过程设计和数据处理方法优化等关键环节提供理论依据和操作指导。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] LIANG X, LI J, ANTONECCHIA E, et al. NEMA-2008 and in-vivo animal and plant imaging performance of the large FOV preclinical digital PET/CT system discoverist 180 [J]. IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences, 2020, 4(5): 622-629.
- [2] ZHANG B, LI B, FANG L, et al. Performance evaluation of new PET/CT DigitMI 930 [J]. IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences, 2025, 9(5): 578-585.

- [3] 李坤, 吴利芸, 陈平, 等. 正电子发射粒子示踪的关键技术与进展[J]. 过程工程学报, 2024, 24(4): 381-390.
- LI Kun, WU Liyun, CHEN Ping, et al. Key technologies and advances of positron emission particle tracking[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2024, 24(4): 381-390. (in Chinese)
- [4] 齐雅楠. 流场中正电子发射粒子追踪(PEPT)技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [5] PELLICO J, VASS L, CARRASCAL-MINIÑO A, et al. In vivo real-time positron emission particle tracking (PEPT) and single particle PET[J]. Nature Nanotechnology, 2024, 19(5): 668-676.
- [6] WINDOWS-YULE C R K, SEVILLE J P K, INGRAM A, et al. Positron emission particle tracking of granular flows[J]. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 2020, 11: 367-396.
- [7] LI K, SAVARI C, BARIGOU M. Predicting complex multicomponent particle-liquid flow in a mechanically agitated vessel via machine learning[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(5): 053301.
- [8] LI K, SAVARI C, SHEIKH H A, et al. A data-driven machine learning framework for modeling of turbulent mixing flows[J]. Physics of Fluids, 2023, 35: 015150.
- [9] LI K, SAVARI C, BARIGOU M. Computation of Lagrangian coherent structures from experimental fluid trajectory measurements in a mechanically agitated vessel[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 254: 117598.
- [10] SYKES J A, WESTON D, ADIO N, et al. Validation of simulations of particulate, fluid and multiphase systems using positron emission particle tracking: a review[J]. Particuology, 2025, 101: 117-145.
- [11] LEADBEATER T, BUFFLER A, VAN HEERDEN M, et al. Development of tracer particles for positron emission particle tracking[J]. Nuclear Science and Engineering, 2024, 198(1): 121-137.
- [12] PARKER D J. Positron emission particle tracking and its application to granular media[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(5): 051803.
- [13] 黄华璠, 梁坤, 刘玉鹏, 等. ^{18}F 标记放射性药物的新方法 with 新技术[J]. 化学进展, 2011, 23(7): 1501-1506.
- HUANG Huafan, LIANG Kun, LIU Yupeng, et al. New methods and techniques for ^{18}F -labeled radiopharmaceuticals[J]. Progress in Chemistry, 2011, 23(7): 1501-1506. (in Chinese)
- [14] 廖光星, 李宁, 杨鸿宇, 等. 常规正电子放射性核素的核纯度检测质控方法探究[J]. 中国医疗设备, 2024, 39(6): 43-48.
- LIAO Guangxing, LI Ning, YANG Hongyu, et al. Exploration of quality control methods for nuclear purity detection of conventional positron radionuclides[J]. China Medical Devices, 2024, 39(6): 43-48. (in Chinese)
- [15] PELLICO J, JADHAV A, VASS L, et al. Synthesis and ^{68}Ga radiolabelling of calcium alginate beads for positron emission particle tracking (PEPT) applications[J]. Chemical Engineering Science, 2022, 264: 118159.
- [16] DINCKAL M, ERGUN K E, KALEMCI M S, et al. Head-to-head comparison of GA-68 PSMA PET/CT and multiparametric MRI findings with postoperative results in preoperative locoregional staging and localization of prostate cancer[J]. The Prostate, 2025, 85(1): 48-57.