使用相位多普勒分析喷雾的时空分析

分析仪数据

Erika Rácz[a,*]、Milan Malý[b]、Jan Jedelský[b]、Viktor Józsa[a]

[a] 能源工程系，机械工程学院，布达佩斯技术与经济大学，Műegyetem rkp. 3. H-1111 布达佩斯，匈牙利

[b] 机械工程学院，布尔诺理工大学，Technicka 2896/2. 616 69 布尔诺，捷克共和国

摘要

喷雾表征通常依赖经验公式、统计分布和导出量。确定性的喷雾行为源于受物理规律支配的雾化机制，例如喷嘴几何结构、边界条件和流体动力学不稳定性。由于雾化过程具有随机性，而这种随机性源于湍流、混沌扰动和液滴间相互作用，因此动态行为的时间特性很少受到研究。这些过程共同导致液滴聚集，这种时空行为正是本文针对气动雾化器的研究重点。相位多普勒分析测得的数据包括液滴尺寸、速度和到达时间。首先，采用卡方假设检验比较理论与实验的粒子间时间分布，结果表明其具有多峰性。其次，采用k均值聚类确定液滴簇，并通过间隙统计量确定簇的数量。上述分析基于一个庞大的数据库开展，涵盖各种测量位置、雾化压力、液体预热温度和液体

类型。研究发现，在单个数据集中，约30%的液滴受到簇形成的影响。总之，中心区域的非稳态性由聚集造成，而喷雾外围的非稳态性则由混合和液滴夹带造成。簇的质心和簇值数量取决于雾化压力和喷雾位置，与液体温度无关。通过比较簇的液滴尺寸和速度分布，发现其动力学行为没有显著差异，这表明如果时间特性至关重要，就有必要进行非定常喷雾建模。

关键词：粒子间到达时间、雾化、PDA、喷雾、泊松行为、k均值聚类

术语表

拉丁字母

符号	描述	单位（如适用）
D	液滴尺寸	µm
j	分箱宽度	ms
An	理论函数误差	-
F	液滴通量	1/s
LHO	轻质取暖油	
max	最大值	
mean	m平均值	
min	最小值	
N	液滴数量	-
p	压力	bar
R	液滴簇中的液滴比例	%
RO	菜籽油	
std	标准差	
t	液滴的到达时间	ms
T	总测量时间	µm
T_p	预热温度	°C
v	速度	m/s
V	克拉默V	-
x	X轴上的径向距离	mm
X	X轴上的x值	
y	Y轴上的径向距离	mm
Y	轴上的y值	
z	Z轴上的轴向距离	mm

下标

符号	描述
a	轴向分量
act	实际值
crit	临界值
g	气相的性质
k	簇的数量
l	液体性质
r	径向分量
t	切向分量
th	理论函数
exp	实验数据

希腊字母

符号	描述	单位（如适用）
α	signifi取消 level	-
Δ	差异	
λ	强度函数	1/ms
χ^2	卡方值	-

1. 引言

文献中采用多种方法描述喷雾，例如经验公式、统计分布和导出量[1]，这是由于雾化过程具有随机性。然而，入口条件等确定性因素会显著影响喷雾特性，因此某些特征量是可预测的。随机效应与确定性效应相结合会形成相干结构，其特征可通过液滴的相关运动来描述。因此，要全面表征喷雾，必须进行时间序列分析。本文评估了气动雾化器喷雾的时间行为，而喷雾模型中很少考虑这一点[1]。

尽管由于液滴通量具有随机性，即使在稳态喷雾中也可能出现液滴聚集，但在本文讨论中，聚集一词特指粒子间到达时间相较于稳态泊松统计预期值出现统计显著偏差的情况。喷雾非稳态性源于流体动力学不稳定性、喷射器相关效应以及外部环境因素之间的复杂相互作用。从流体动力学角度来看，瑞利–普拉托[2]和开尔文–亥姆霍兹不稳定性、液体射流或液膜中的湍流[3]、液滴间相互作用（包括聚并[4]）以及二次破碎，都会导致喷雾结构随时间变化[1]。气液耦合[5]会进一步调制这些过程，周围流场中的涡结构[6]会引发额外的波动[7]。在喷射器层面，压力振荡[8,9]、液体供给系统中的流动脉动[10]、喷嘴内的空化[11]以及几何缺陷或沉积物，都可能导致非稳态过程。环境因素，例如环境气体中的湍流和密度梯度[12,13]、受限腔室内的声学激励[14,15]，以及外部振动或加速度[16]，也可能进一步加剧喷雾非定常性。总之，喷雾非定常性是一种多因素现象，源于

内部不稳定性、喷嘴动力学以及与周围流场相互作用的共同作用。

喷雾非定常性在燃烧器等应用中至关重要，因为雾化过程或喷雾扩散中的非定常性[17]会引发热声问题、热释放不均匀以及污染物排放增加[18]。因此，在设计阶段进行时空分析对于解决运行不理想的问题至关重要。在喷涂过程中，液滴到达率不均会导致覆盖不均匀，并增加过程控制难度[19]。在农业喷洒和农药施用中，液滴排放的时间波动会造成农药沉积不均，导致植物表面的某些区域施药过量，而另一些区域施药不足。这种不均匀性会降低处理的整体效果，助长害虫抗药性的发展，并导致化学品消耗过量[20]。在肺部药物递送中，气溶胶剂量必须精准且可重复。喷雾脉动会使药物沉积产生变化，从而损害给药准确性并降低治疗效果。考虑非定常性对于获得可靠的测量结果至关重要，因为时间波动会影响结果的可重复性及其解读[21,22]。忽略非定常性可能会扭曲液滴尺寸分布或到达间隔时间等统计特征，掩盖重要的物理机制，甚至导致测量技术选择不当。

Edward 和 Marx[23–26]讨论了理想喷雾理论。理想喷雾被定义为具有四种性质：喷雾中的液滴是互不作用的点粒子，每个点粒子都带有一组用于表示液滴特征的标记，并且将喷雾视为一个随机的马尔可夫过程。在本研究中，喷雾均匀性指的是时间上的均匀性。此外，“非均匀”或“非稳态性”表示

一般理想喷雾在空间和/或时间上的统计量并非均匀。假设喷雾处于稳态，粒子间到达时间分布应符合泊松统计。他们的多点统计描述使得能够确定分散结构的稳态性[26]。

文献中可找到用于研究喷雾稳态性的不同框架。相位多普勒分析（PDA）能够同时测量液滴尺寸、速度和到达时间，因此可以对喷雾进行时间分析。理想喷雾理论已在多项研究中得到成功验证，这些研究分析了压力式、双流体[27]、起泡式[28,29]雾化器，以及在旋流和高温条件下的压力式雾化器喷雾的PDA数据[30]。Jedelsky 和 Jicha [31]也将这一方法应用于起泡式雾化器的PDA数据。他们得出结论，气液比会影响混合室内的压力波动。Acharya 等人[32]利用空心气流雾化器和压力旋流式雾化器的PDA数据，采用时空相关和时间序列建模范式研究了这一过程。他们采用了包括自相关和偏自相关在内的时间序列框架，以识别特征结构。此外，他们还开发了适当的广义自回归条件异方差模型。Heinlein 等人[33]采用神经网络模型拟合压力式雾化器的PDA数据；由于非稳态性和雾化不完全，部分喷雾区域的实验结果与计算结果吻合较差。

本文的创新之处在于研究气动雾化器的PDA数据集，并基于单个液滴的粒子间到达时间分析喷雾的时空行为。在此前的可视化研究中，观察到了不规则性。与预期的粒子间到达时间分布呈泊松行为不同，研究发现了多峰性，这表明多种不同的物理现象可能同时存在，并可能因液滴延迟到达而扭曲喷雾的准稳态特性

。忽略这些不规则性可能会导致显著偏差。首先，需要将这些不规则性分离出来，以研究其影响。为此，研究人员对数据集应用了k均值聚类，以估算可能存在的液滴簇数量。所提出的计算方法采用了一种稳健的无监督学习算法，可普遍应用于不同的雾化器。研究结果有助于开发用于喷雾数据的高级时间序列模型。

2. 材料与方法

实验装置详见第 2.1 节，其中概述了雾化器的关键参数和测量条件。第 2.2 小节重点介绍原始 PDA 数据的处理，尤其关注粒子间到达时间。所有计算均在 MATLAB R2024b 软件环境中完成。

*2.1 PDA*测量

以下测量和雾化器的概述均已在先前的研究中完成并详细说明 [34]。本小节重点介绍理解处理后数据所需的关键参数。

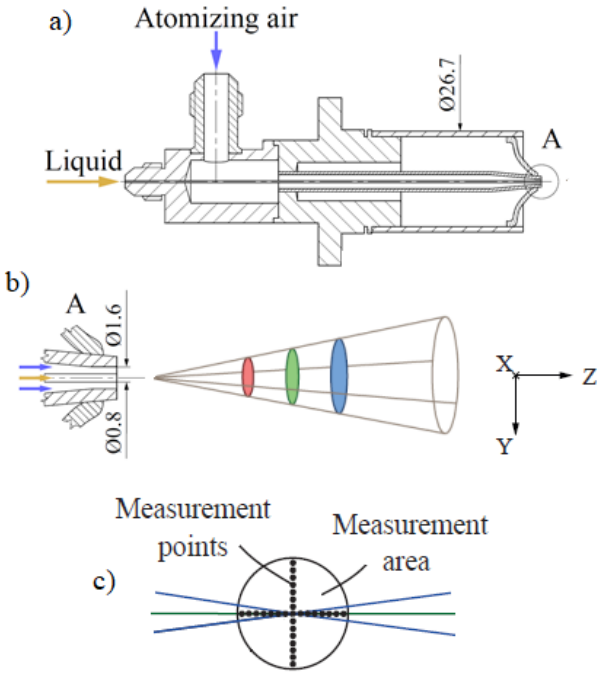

图 1。气动雾化器的几何结构 [34]。

所研究的气动雾化器横截面如图 1a 和图 1b 所示。液体流经内径为 0.4 毫米的管道，而雾化空气则从同心环隙中排出（外径为 1.4 毫米，内径为 0.8 毫米）。高速空气掠过低速液体射流的表面，使液体射流迅速破碎成液丝，继而形成微小液滴。

使用双分量基于光纤的相位多普勒分析仪测量液滴尺寸和速度。采用波长为 514.5 和 488 nm 的氩离子激光器测量两个速度分量，并使用前一对光束的信号计算液滴直径。光学系统保持固定，同时由计算机控制的三维移动系统定位雾化器。

如图 1b 和 1c 所示，PDA测量在 Z 轴上的 90 个测量点进行，分别位于三个轴向距离处：z = 20、40 和 60 毫米。沿 X 轴和 Y 轴

在z = 60 毫米处选取了 15 个径向点，在z = 40 毫米处选取了 13 个，在z = 20 毫米处选取了 17 个等间距径向点。在z = 20 毫米处，测点间步长为 1 毫米；在z = 40 和 60 毫米处，步长为 2 毫米。PDA 系统将采集限制为最多 40,000 个单个颗粒或 15 秒的记录时间，因此合理地限制了外围区域的采集。

测试了四种不同的液体：柴油、轻质取暖油（LHO）、菜籽油（RO）和水。预热温度T_P设为 25、40、55、70 和 100 °C；水的最后一个温度点设为 90 °C，以避免沸腾。研究了以下雾化表压p_g：0.3、0.6、0.9、1.2、1.8 和 2.4 bar。表 1 列出了所有测量设置；对每种组合均进行了测试，共得到 120 种不同的喷雾，每种喷雾包含 90 个测量点。所测试液体及测试条件下关键无量纲数的范围汇总于[35]。

表 1. 评估的测试条件。

参数	数值		
Fuel	柴油。LHO。RO。水		
p_g [巴表压]	0.3。0.6。0.9。1.2。1.8。		
	2.4		
p_l [巴格]	0.01		
T_p [°C]	25、40、55、70、100		
	(水: 90)		
z [毫米]	20	40	60
X轴/Y轴 [毫米]	-8–8	-12–12	-14–14
步长 [毫米]	1	2	2
沿线测量点 X/Y	17	13	15

2.2 数据处理

理论上，液滴到达时间的时间分布（t）符合泊松行为，而粒子间到达时间分布（Δt）符合指数分布[24,26]。为了比较假设函数与实验结果，

进行了以下计算 [27]。两个连续液滴的粒子间时间分布为：

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}, \tag{1}$$

在时刻i，其中$i \in [2, N]$，且N为单个测量点的液滴总数。

实验粒子间时间函数：

$$h_{\exp}(\tau_j) = \frac{H(\tau_j)}{N \cdot \Delta\tau_j}, \tag{2}$$

其中，$\Delta\tau_j$ 是j^{th} 粒子间时间间隔的宽度，τ_j，而$H(\tau_j)$是落入该间隔的Δt_i 的数量。粒子间时间间隔的数量（j）根据 Rice规则计算：

$$j = 2 \cdot \sqrt[3]{N}. \tag{3}$$

$\Delta\tau_j$ 可按j如下计算：

$$\Delta\tau_j = \frac{T}{j}, \tag{4}$$

其中T为总测量时间。根据[24]，将理论粒子间时间函数 $h_{\text{th}}(\tau_j)$按样本总数归一化，并将事件计数记为 $H_{th}(\tau_j)$：

$$h_{\text{th}}(\tau_j) = \frac{(T-\tau_j)\cdot\lambda^2\cdot e^{-\lambda\cdot\tau_j}}{\lambda\cdot T - 1 + e^{-\lambda\cdot T}}, \tag{5}$$

$$H_{th}(\tau_j) = h_{\mathrm{th}}(\tau_j) \cdot N \cdot \Delta\tau_j, \tag{6}$$

其中 λ 是泊松过程的强度函数，假设其在测量时间内保持恒定，并根据实验分布的参数计算得出：

$$\lambda = \frac{N}{T}. \tag{7}$$

此外，理论函数值是根据实验分布各分箱边界的均值计算得出的。

3. 结果与讨论

首先，本文评估非泊松行为和不确定性，并在第3.1小节中重点介绍如何根据结果确定最优聚类数。第3.2节总结了用于非稳态检测的 χ^2 test 结果。随后，第3.3小节展示了k均值聚类的结果。移除额外簇后，在第3.4小节中再次进行非稳态检测。第3.5小节总结了各种液体的结果对比。接着，第3.6小节介绍液滴簇的动力学行为。

3.1 非泊松行为评估

图2显示了所列各情形中理论函数存在不规则性，但其来源尚不明确。理论泊松分布具有随机性：即使喷雾完全稳定，有限采样也会产生波动。首先，需要确定这些不规则性是由随机噪声造成的，还是表明存在真实的液滴聚集。在

图2中的误差棒表示由于理论喷雾的随机性，理论结果预期会产生的偏差。在理论函数的每个区间中，$H_{\mathrm{th}}(\tau_j)$ 是一个离散变量，表示独立变量的计数。因此，它服从泊松分布，每个区间的预期偏差等于该区间计数的平方根。因此，误差通过线性变换将偏差归一化后计算得出：

$$E_j = \frac{\sqrt{H_{\mathrm{exp}}}}{N \cdot \Delta\tau_j}\,. \tag{8}$$

如果差异超出了泊松随机性所能解释的范围，那么喷雾就确实处于非稳态，因此这种不规则性不能仅用随机性来解释。

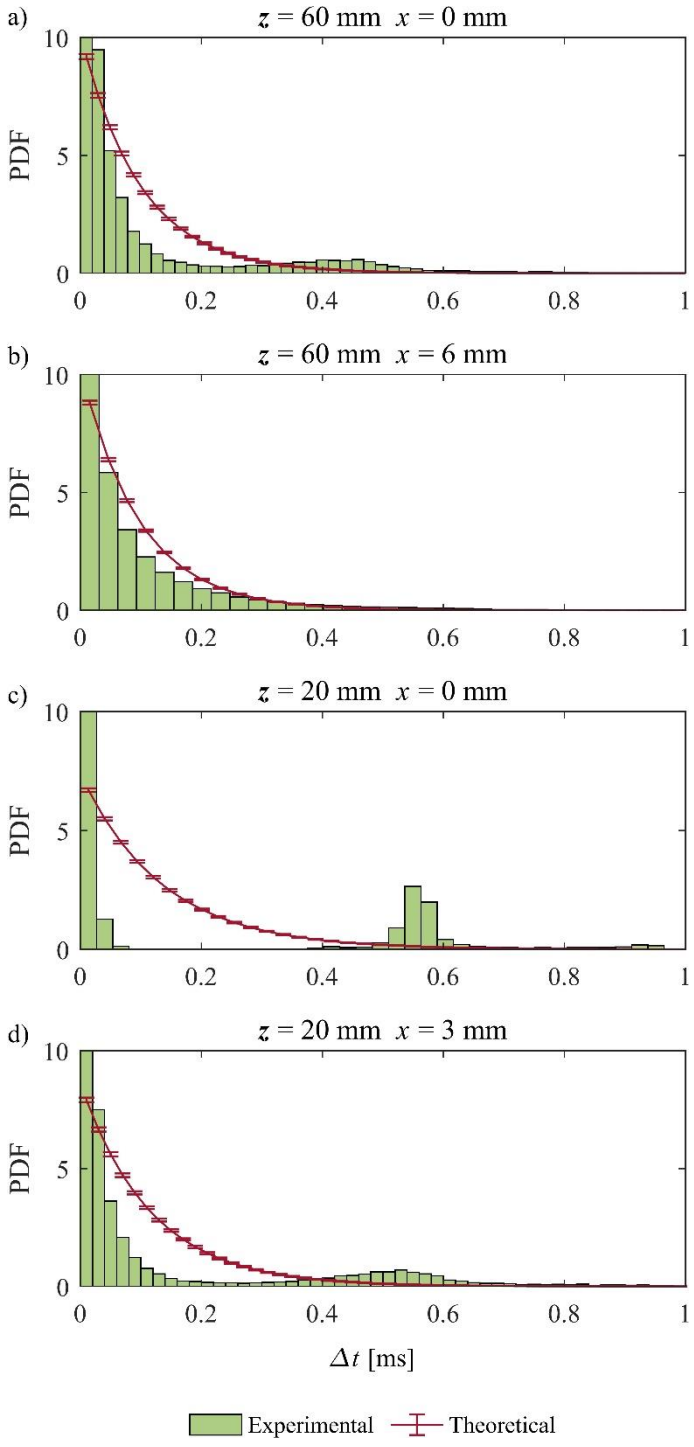

图2。 柴油在T_p = 100 °C和 p_g = 1.8 bar下的颗粒间到达时间分布：a) z = 60 毫米和 x = 0 毫米，b) z = 60 毫米和x = 6 毫米，c) z = 20 毫米和x = 0 毫米，以及d) z = 20 毫米和x = 6 毫米。

为以统计学上严谨的方法证明稳态性或非稳态性，采用卡方统计假设检验比较理论函数和实验分布；χ^2 的计算方法如下：

$$\chi^2_{\mathrm{act}} = \sum_{k=1}^{j} \frac{\left(h_{\mathrm{exp}}(\tau_k) - h_{\mathrm{th}}(\tau_k)\right)^2}{h_{\mathrm{th}}(\tau_k)}, \tag{9}$$

并假设其服从自由度为（j-1）的χ^2 分布。

根据显著性水平α，可以接受或拒绝实验值与理论值相似这一假设；该显著性水平取为0.05。具有α 和（j-1）个自由度的统计量临界值$\chi^2_{\mathrm{crit}}(1\text{-}\alpha, j\text{-}1)$可从$\chi^2$ 表中估算。若$\chi^2_{\mathrm{act}} < \chi^2_{\mathrm{crit}}$，则可接受该假设；因此，可以认为喷雾局部点处于稳态，差异可能是由随机波动造成的。否则，应拒绝该假设，且喷雾不太可能是随机的，因此处于非稳态。随着j箱数变化，χ^2_{act}的值以及检验结果可能随之显著改变，因为许多数据集呈现多峰分布，如第3.1小节所示。由于χ^2 值取决于样本量，因此采用 Cramér 的V作为效应量，用于衡量χ^2 独立性检验或拟合优度：

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2_{\mathrm{act}}}{N \cdot (j-1)}}, \tag{10}$$

该指标表示两个分类分布之间关联（或差异）的强度，不受样本量影响。当V相对较低（约为 0.15）时，喷雾不稳定，且在统计学上与理论泊松模型存在差异；不过，这种影响

相对较小，在实际中并不显著。较高的V表明这种差异在实际意义上显著，例如喷雾中存在明显的聚类，且泊松模型的拟合效果较差。

考虑到这一现象，需要采用进一步的方法分析统计检验结果未能反映的多峰性特征。为确定液滴被划分的簇数，采用了 k 均值聚类算法 [36]。k 均值聚类通过选取k个初始簇中心，将每个数据点分配给最近的中心，然后根据分配给各中心的数据点重新计算中心（即取这些点的均值）。这一分配—更新过程会重复进行，直到簇分配不再变化或达到设定的迭代次数，目标是使数据点与其簇中心之间的欧几里得距离总和最小。

在目视考察过程中，数据呈现出按 Δt聚类的现象，根据测量参数和喷雾中的位置，分为一个至三个簇。因此，使用了*evalclusters* [37] Matlab 函数，根据间隙统计量 [38]确定最优簇数。该函数将聚类结果的簇内离散度与同一范围内参考数据集的簇内离散度进行比较。选择间隙最大的k作为最优簇数。距离度量选用平方欧几里得距离。计算间隙统计量时，在所考察的 Δt范围内生成了100个均匀分布的参考数据点。

液滴被划分为k个簇，每个液滴都属于均值最近的簇，该均值称为质心，Δt_k。一个簇中的液滴数量N_k与液滴总数之比：

$$R_k = \frac{N_k}{N}, \tag{11}$$

其中$k \in [1, 3]$ 是液滴簇的索引。第一簇（$k = 1$）的Δt_k最低，而Δt_k 随k增大而增大。此外，还为计算设定了特定条件：对于包含多个簇的数据，第二簇和第三簇必须至少包含100个液滴。采用这一条件可以避免离群值可能以独立簇形式出现而造成的扭曲影响。如果不满足该条件，则使用较低的k重复聚类，直至间隙统计量找到最优解。在评估结果时，观察到k增大、R_k减小，以及Δt_k增大的情况。然而，在少数测量数据集（占全部数据集的比例不到1%）中，聚类方法未能识别出具有这些属性的簇。因此，对于这些情况，计算会持续进行，直到获得所需的属性。

对液滴簇的Δt_k、k、R_k及动态行为进行了调查和比较。比较了簇的液滴尺寸、D、速度、v分布和统计量，以及它们对测量参数（液体、p_g和T_p）和喷雾中位置（x、y、z）的依赖性。单个液滴的速度v分别根据其沿 X轴和 Y轴的速度分量计算得到：

$$v = \sqrt{{v_a}^2 + {v_r}^2}\,, \tag{12}$$

$$v = \sqrt{{v_a}^2 + {v_t}^2}\,, \tag{13}$$

其中，v_a 为轴向分量，v_r 为沿X轴的径向分量，v_t 为沿Y轴的切向分量。

3.2 非稳态性识别

图2展示了柴油在T_p = 100 °C和 p_g = 1.8 bar条件下不同位置的实验和理论粒子间到达时间分布。实验分布根据式（2）获得，理论分布则根据式（6）获得。理论分布与实验分布之间的差异表现为多种形式。图2b显示，Δt的实验分布为单峰分布，与理论函数略有不同。图2a和图2d显示，Δt分布为双峰分布，第二个峰位于约0.4–0.5 ms处。图2c显示了多峰分布，第三个峰位于约0.9 ms处，且在0.1至0.4 ms范围内没有液滴。在多峰情况下，可以观察到明显可辨认的粒子间到达时间峰值，这表明液滴存在聚类。此外，误差棒（E_j）表明理论结果与实验结果之间存在显著差异。图2b显示的是单峰分布，但尽管没有聚类，偏差仍表明存在非定常行为。因此，有必要考察非稳态性是自然产生的，还是由聚类导致的。雾化参数和喷雾中的位置可以改变分布形状，和/或使分布呈现多峰性；因此，聚簇倾向在很大程度上取决于具体条件。这些因素对聚类的影响将在第3.3小节中说明。

由于N较高，即使是最小的差异也具有显著性，因此，当α = 0为 .05 时，χ^2 检验在几乎所有数据集中都拒绝了零假设。V值对χ^2_act进行归一化，是衡量检验结果更合适的指标。尽管液滴尺寸和速度沿X轴的非对称性比沿Y轴更明显[16, 17], ，但为展示测量结果所反映的实际流动模式，本文仍沿X轴呈现结果。

图3a展示了V的结果，图3b展示了柴油在T_p = 25 °C 和p_g = 0.3 bar 条件下 x–z 平面上的液滴通量F。在x = 0 毫米处靠近轴线的位置，尤其是喷嘴出口附近，观察到较大的效应量，这是由簇的出现所致。此外，

尚不清楚这种效应是否因喷嘴出口处液体与气体之间混乱的三维相互作用而增强。随着 $|r|$ 增大，V迅速下降；最小值出现在$r = \pm 5–7$ 毫米附近，具体位置取决于z。在该区域，F与V之间没有相关性。随后，由于液滴混合和卷吸增强，V向喷雾外围增大，从而降低液滴通量。在每个测量参数下都观察到相同趋势，但幅度各不相同。文献[27]中研究的双流体雾化器在χ^2 值方面表现出类似趋势，但该文未讨论V。

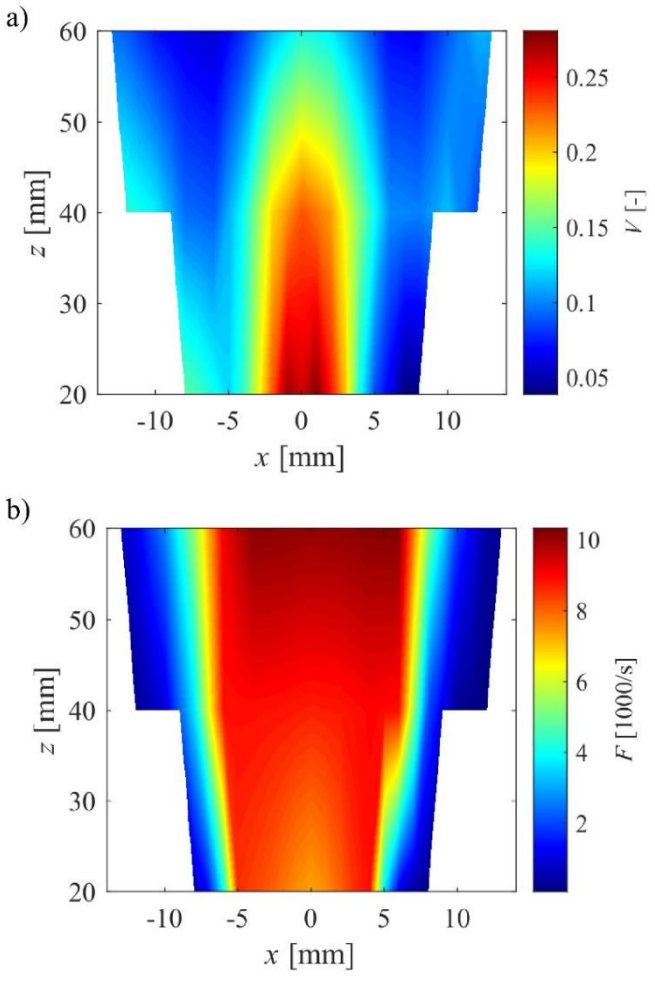

图 3.结果 V在$x–z$平面上的结果，柴油在p_g = 03 bar、T_p = 25 °C 条件下：a）χ^2 检验的效应量，以及 b ）液滴通量F，即液滴数量N与总测量时间T之比 .

图4显示，柴油喷雾沿X轴的V取决于p_g和T_p，且随z值而变化。如图4a、4c和4e所示，随着z增加，V降低；随着p_g增加，V略有上升。p_g = 1.8和2.4巴是例外，因为喷雾中形成了超音速流[34]。图4b、4d和4f显示，随着T_p增加，V在x = 0 毫米中心轴附近略有上升，但这一效应在较低z值时消失。

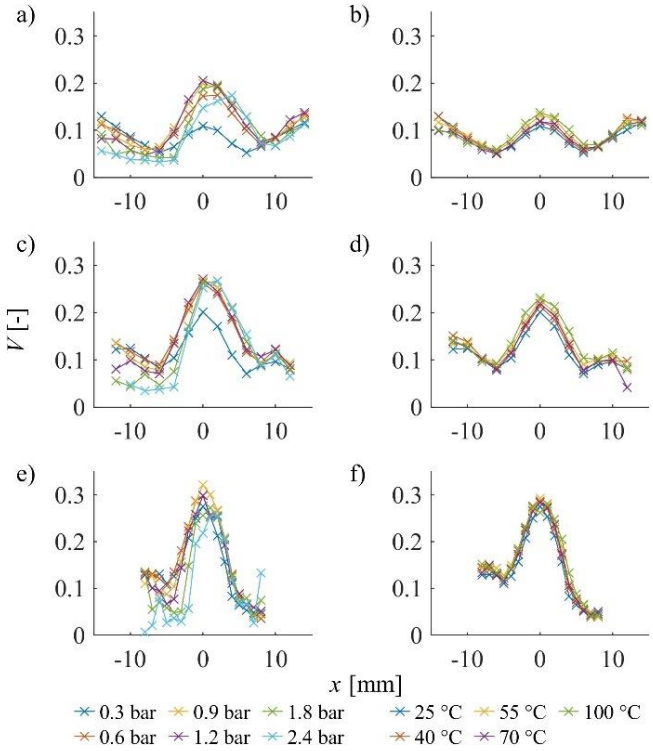

图4。 柴油喷雾沿X轴的V随T_p和p_g变化：第一列表示在T_p = 25 °C时随p_g的变化，第二列表示在p_g = 0.3巴时随T_p的变化；a–b）z = 60 毫米处，c–d）z = 40 毫米处，e–f）z = 20 毫米处。

3.3 簇检测与定义

图5显示了在温度为T_p = 25 °C、压力为p_g = 0.3 bar时，柴油沿X轴方向各簇的Δt_k和R_k。图5a、5c和5e展示了不同z下Δt_k的结果。在喷雾中心附近可以观察到多个簇，而<style id='k'>k值随轴向距离和径向距离的增加而减小。在喷雾外围出现一个簇，其中Δt_1增加，这是由于数据采集率较低，且相对较慢的混合过程导致液滴夹带程度适中

。Δt_2 和Δt_3 随径向距离增加而略微减小。

图5b、5d和5f显示了相应簇的R_k。当第二簇和/或第三簇出现时，R_1 会减小。随着z减小，这种效应会增强。总之，在喷雾核心处，雾化过程得到强化，聚类效应更容易发生。此外，在较高z下，在喷雾的充分发展区内，雾化过程已经完成，由于喷雾膨胀和湍流混合[39]导致F迅速减小，第二簇和第三簇往往会消失，或出现在较小的$|r|$ 区域内。对于所有液体、p_g和T_P，尽管强度有所不同，也会出现这些特征，相关讨论见第3.5小节。

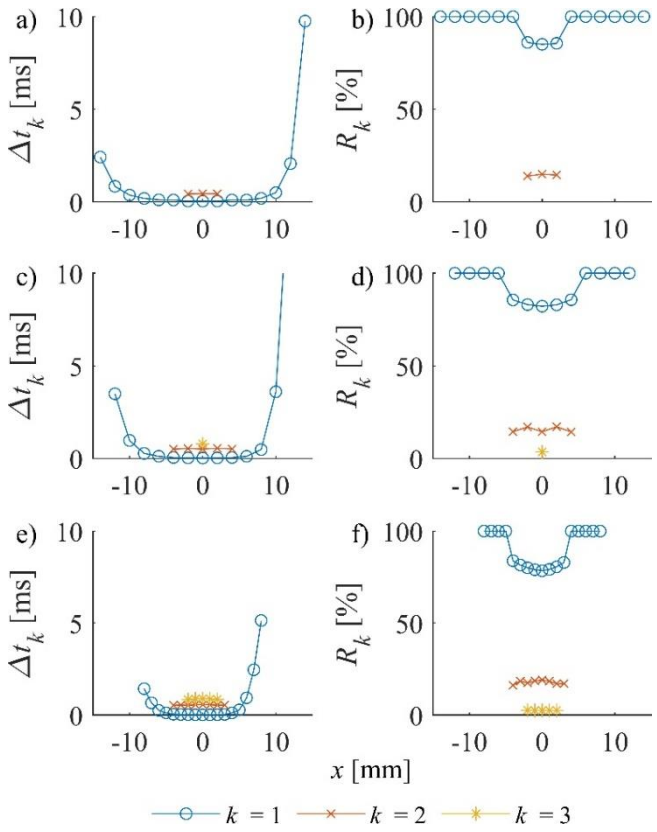

图5。 不同喷嘴距离下，左列为Δt_k、右列为R_k 的径向分布（沿X轴）：a–b）在z = 60 毫米处，c–d）在z = 40 毫米处，e–f）在z = 20 毫米处。结果对应于

柴油在T_p = 25 °C和p_g = 0.3 bar下的测量结果。请注意，缺失的标记表示相应簇不存在。

由于三个簇的行为各不相同，因此分别进行讨论。图 6 显示了沿 X轴方向，柴油在T_p = 25 °C 时，第一簇的 Δt_1 和 R_1 结果随p_g 变化的径向分布。图 6a、6c 和 6e 显示，Δt_1 完全不依赖于任何z处的p_g。由于朝向中心轴的速度增加，且该处雾化增强，[17, 18], 因此它依赖于r。图 6b、6d 和 6f 显示，随着p_g增加，R_1 减小，同时出现更多簇。这种效应在z和 $|r|$减小时会增强。 此外，T_p 不会影响Δt_1 或R_1。这些结论与以下事实一致：随着p_g增加，V也会增加。

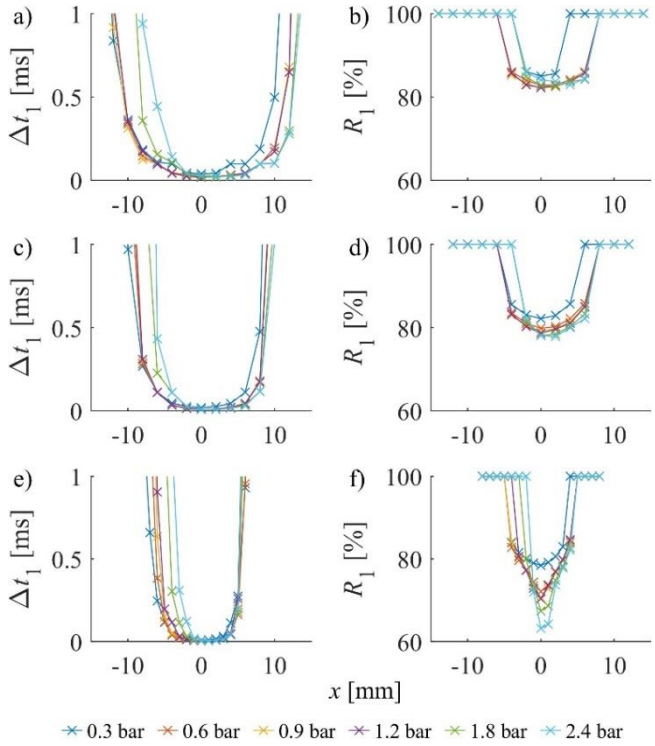

图 6。 柴油在 $T_p = 25$ °C 下，由 p_g 得到的第一簇结果的径向分布（沿 X轴）：第一列对应 Δt_1，第二列对应 R_1,；a–b) 位于 $z = 60$ 毫米处，c–d) 位于 $z = 40$ 毫米处，e–f) 位于 $z = 20$ 毫米处。请注意，为确保透明度，a)、c) 和 e) 的纵轴范围限制为 1 ms。

图 7 显示了沿 X轴方向，柴油在$T_p = 25$ °C 时，第二簇的 Δt_2 和 R_2 随p_g 变化的径向分布。随着压力增加，R_2 增大，而 Δt_2 不依赖于p_g。随着z距离增加，t_2 和R_2 均减小。此外，T_p 不会影响Δt_2 或R_2。

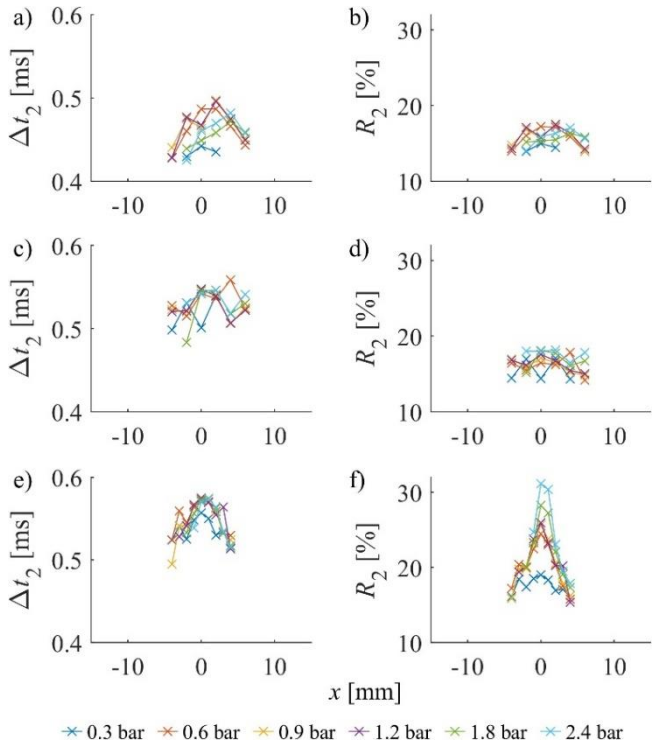

图 7。 柴油在 $T_p = 25$ °C 下，由 p_g 得到的第二簇结果的径向分布（沿 X轴）：第一列对应 Δt_2，第二列对应 R_2,；a–b) 位于 $z = 60$ 毫米处，c–d) 位于 $z = 40$ 毫米处，e–f) 位于 $z = 20$ 毫米处。

图8显示了沿X轴，柴油在$T_p = 25$ °C时，第三簇的t_3 和R_3 随p_g 变化的径向分布。图8e和图8f显示，只有在t_3 和R_3 增加

随着压力升高，喷雾核心处的雾化增强，因此$z = 20$ 毫米处的t_3 和R_3 均增大。随着z距离增加，两者的值均较低。此外，T_p 对t_3 和R_3均无影响。总之，R_1 减小，而R_2 和R_3 增大。此外，出现较多簇的径向范围可能因雾化参数而异。通常，$p_g = 0.3$ bar时的该范围较窄，如图6–8所示。这些结论也与以下事实相符：随着p_g增加，由于聚簇倾向增强，V也会增加。

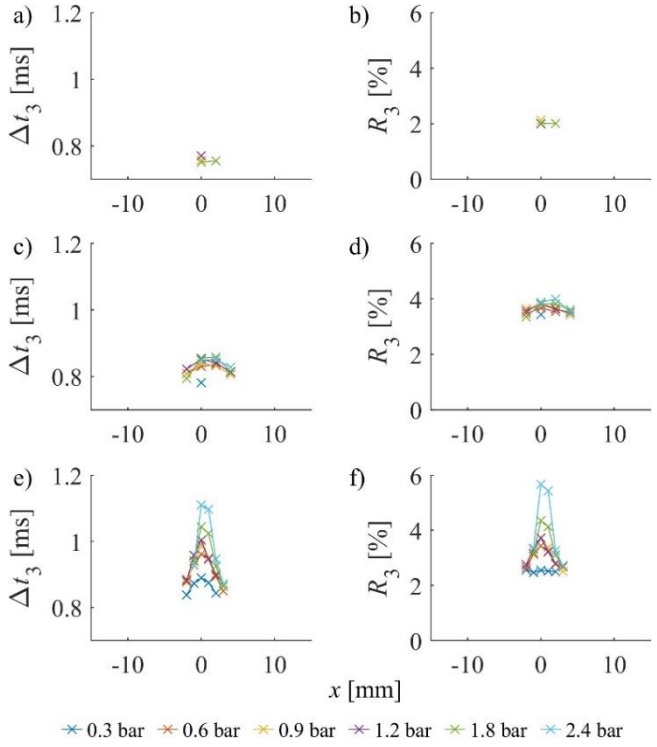

图8。柴油在$T_p = 25$ °C下第三个簇结果沿X轴的径向分布：第一列对应Δt_3，第二列对应R_3,；a–b）位于$z = 60$ 毫米处，c–d）位于$z = 40$ 毫米处，e–f）位于$z = 20$ 毫米处。

3.4 通过额外簇移除进行喷雾稳定性研究

为确定非稳态性是自然现象还是聚类造成的，在从数据集中移除额外簇（$k = 1$ 和2）后，进行了第3.2节中的统计研究。图9显示了沿X轴的V随p_g 和T_p 的变化，针对

不同z下的柴油。标记表示测量点，这些测量点包含多个簇。在该区域内，V从0.3降至0.05，表明效应量较弱，非稳态性实际上可忽略不计。在每个测量参数下都发现了相同的趋势。

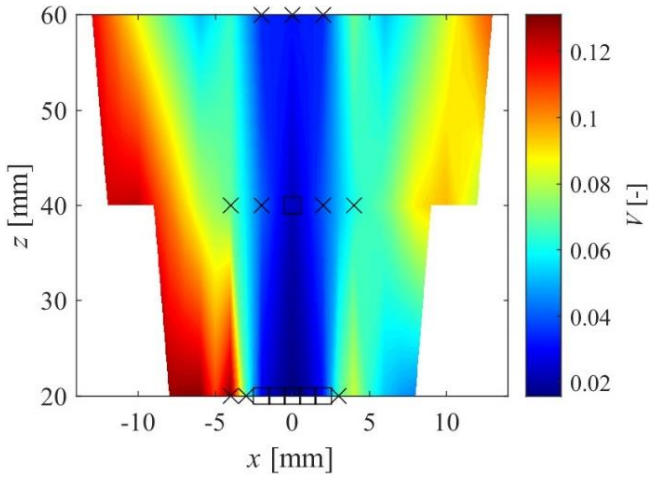

图 9. 去除额外簇后，柴油在p_g = 0.3 bar、T_p = 25 °C 条件下，V在x–z平面上的结果。标记为“x”的测量点原本具有k = 2，而标记为“□”的测量点具有k = 3。

图10显示了去除额外簇后，柴油沿X轴方向随T_p 和p_g 变化的V。标记表示k = 2 或3的测量点。在这些点处，V在每个$|r|$处均显著降低。随着压力增加，V降低，而其不随T_P变化。总之，在x 和 y = 0 毫米附近的轴向区域，非稳态性由聚类引起；而在较高的$|r|$处，则是由于混合增强和液滴夹带[1,39]所致。

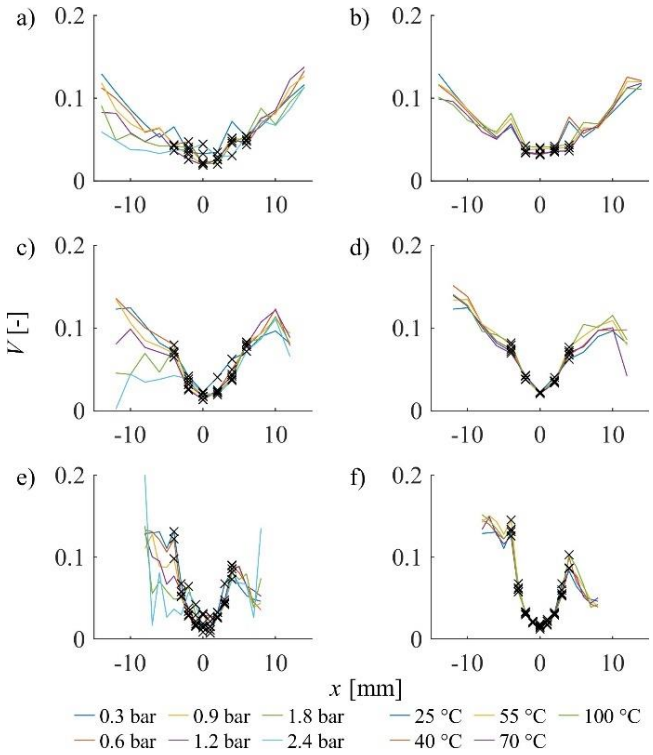

图10。 V沿X轴随T_p 和p_g 的变化情况（柴油，移除额外簇后）：第一列为p_g 在T_p = 25 °C时的变化情况，第二列为T_p 在 p_g = 0.3 bar时的变化情况；a–b）在z = 60 毫米处，c–d）在z = 40 毫米处，e–f）在z = 20 毫米处。标记x表示存在聚类。

3.5 液体比较

表2列出了每种液体在2,700个测量数据集中的一簇、两簇和三簇情况的数量。对于柴油、残渣油和水，一簇数据最为常见，其次是两簇情况，最后是三簇情况。然而，对于LHO，三簇情况比两簇情况更为常见。此外，各液体按聚类频率从高到低依次为LHO、柴油、残渣油和水。因此，我们可以得出结论：沿径向方向，两簇情况在一簇情况和三簇情况之间发生过渡。在10,800个数据集中，有30%表现出聚簇倾向。

表2。液体中单簇、双簇和三簇情况的数量。

液体	k = 1	k = 2	k = 3

	[-]	[%]	[-]	[%]	[-]	[%]
柴油	1583	58.63	607	22.48	508	18.81
LHO	1521	56.33	582	21.56	597	22.11
RO	1600	59.26	565	20.93	535	19.81
水	1761	65.22	523	19.37	416	15.41

在不同情况下，R_k 和 Δt_k 统计量可能有所不同；因此，我们针对每种情况分别讨论结果。在单簇情况下，R_1 为 100%。在喷雾中心，Δt_1接近零，测量系统设定的最小值为 0.0001 毫秒。相比之下，朝向喷雾外围时，该值会增大，如图5所示。由于喷雾外围的数据采集率低且液滴卷吸较弱，导致数值较高，因此 Δt_1 变化显著。

图11显示了双簇情况下按液体分组的 Δt_k直方图，图12显示了按液体分组的 R_k 直方图。尽管四种液体的聚类倾向不同（如表2所示），其结果仍相似。Δt_1 的平均值为 0.034– 0.036 毫秒，而 Δt_2 的平均值为 0.492–0.497 毫秒，水除外，其平均值为 0.477 毫秒。R_1 的平均值为 82.97–84.73%，而 R_2 的平均值为 15.27– 17.03%。最低的 R_1 和最高的 R_2 对应残渣油，而最高的 R_1 和最低的 R_2 对应水。

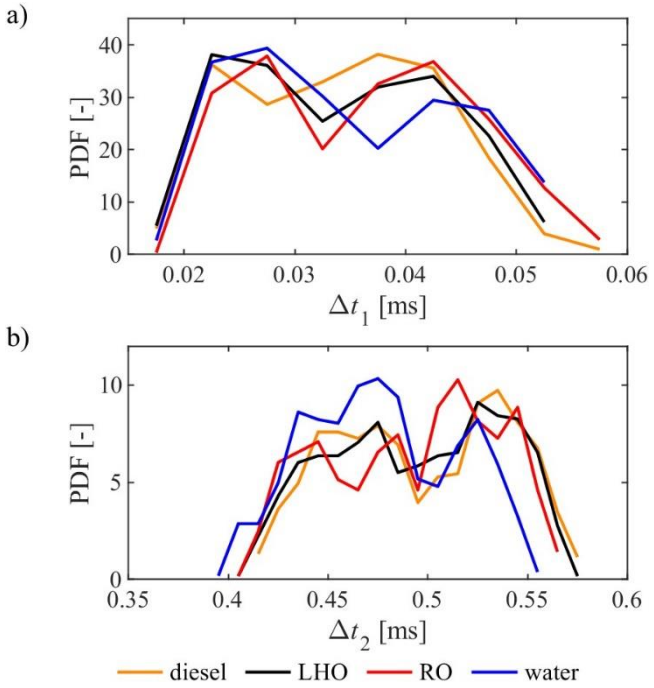

图 11. 液体双簇情况下Δt_k 的直方图：a) Δt_1 和 b) Δt_2。

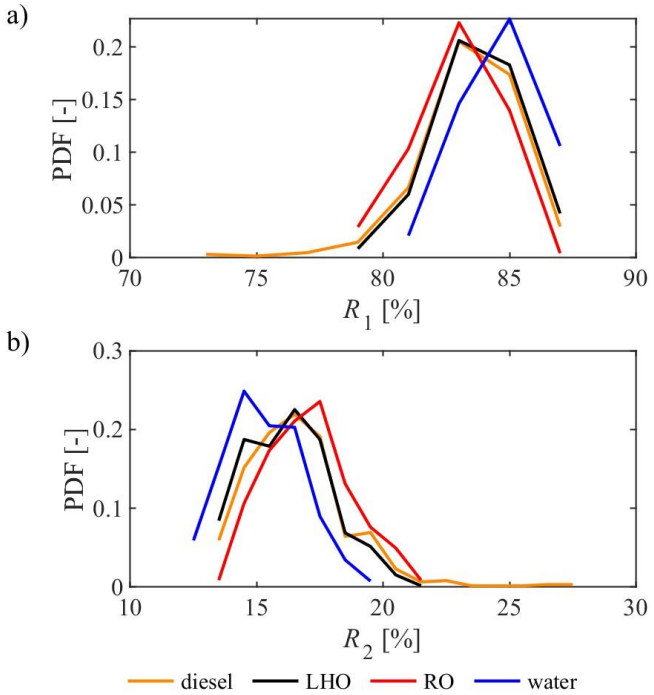

图 12. 液体双簇情况下R_k 的直方图：a) R_1 和 b) R_2。

图13显示了Δt_k的直方图，图14显示了按液体分组的三簇情况下 R_k 的直方图。四种液体的结果与两簇情况下的结果相似。Δt_1 的平均值为 0.010–0.012 毫秒，Δt_2 的平均值为 0.535–0.543 毫秒，Δt_3 的平均值为 0.86–0.90 毫秒。三簇情况下的Δt_1 低于两簇情况，因为 k 随 p_g 增大，而速度增大会使液滴的粒子间到达时间缩短。另一方面，三簇情况下的Δt_2 平均值高于两簇情况。这是因为与三簇情况相比，两簇情况出现在更高的|r| 区域，而在该区域中，Δt_2 会减小。R_1 的平均值为 76.24–80.17%，R_2 的平均值为 17.23–20.55%，R_3的平均值为 2.6–3.21%。由于三簇情况通常出现在较高的 p_g 下，因此该情况下的 R_2 高于两簇情况。受此影响，R_1 低于两簇情况。关于Δt_k 和 R_k 的其他相关统计量，如最小值、最大值、平均值和标准差，可见补充材料：两簇情况见表 S1 和 S2，三簇情况见表 S3 和 S4。

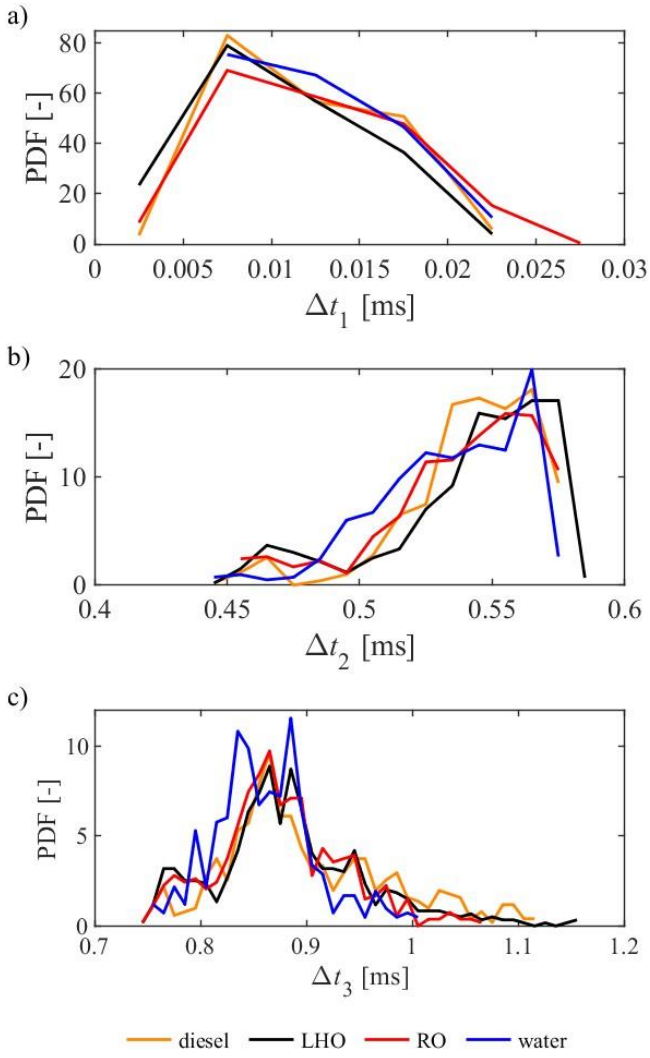

图13。 Δt_k 液体双簇情况的直方图：a) Δt_1, b) Δt_2, 以及 c) Δt_3。

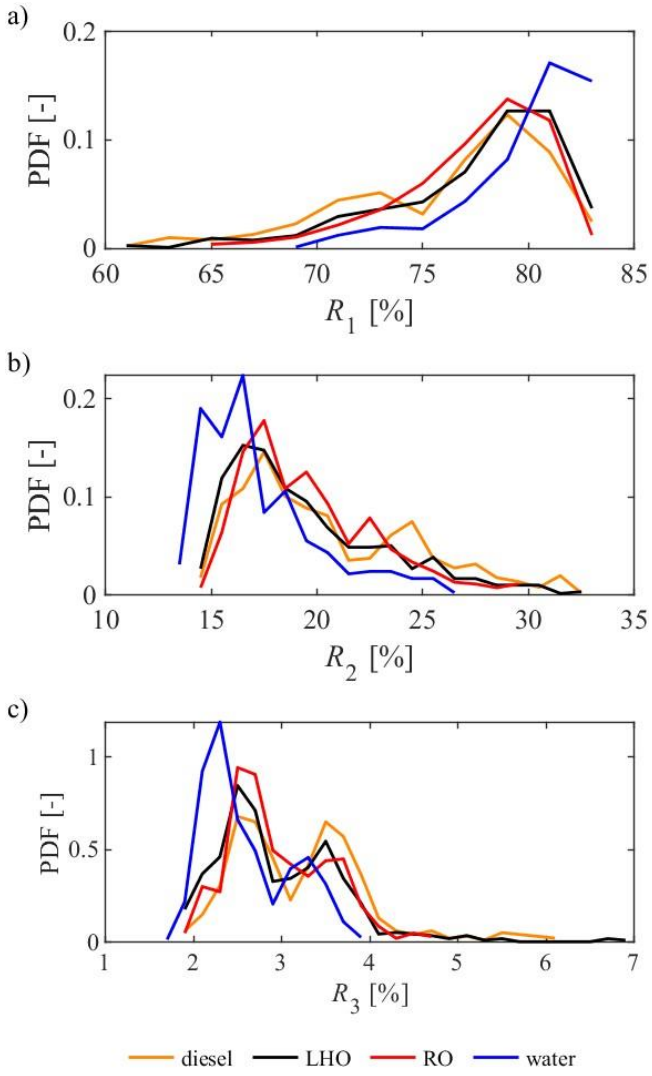

图14. 双簇情况中液体的R_k 直方图：a) R_1, b) R_2, 和 c) R_3。

对于水，聚类不太容易发生；如图9–12所示，其直方图与其他液体的行为略有不同，因为其$\langle R \rangle_k$分布呈现出更高的峰值。具体而言，$\langle R \rangle_1$ 值较高，而$\langle R \rangle_2$ 和$\langle R \rangle_3$ 值较低，这意味着水的聚类程度略弱于其他液体。对此的一种解释是表面张力这一雾化过程的控制参数：水的表面张力几乎是其他液体的三倍[34]。这反映在以下现象中：在低压下，水在中心区域形成簇的频率较低；而在高压下，结果与其他液体相似。

总体而言，对于所有液体，簇形成涉及30%的数据集。在这些数据集中，从$\langle R \rangle_k$的平均值和最大值可以看出，有相当数量的液滴属于第二簇和第三簇；因此，在现实的雾化器模型中应考虑聚类效应。

3.6 簇表征

通过考察液滴簇的D和v分布，可以比较其动态行为。如图15所示，按簇划分的D、v和Δt之间的相关性取决于喷雾中的径向位置。图15b和图15c显示，各簇明显可分。此外，图15a表明，在D–v平面上，各簇无法分离，且彼此之间以及与完整数据集的特征可能存在差异。

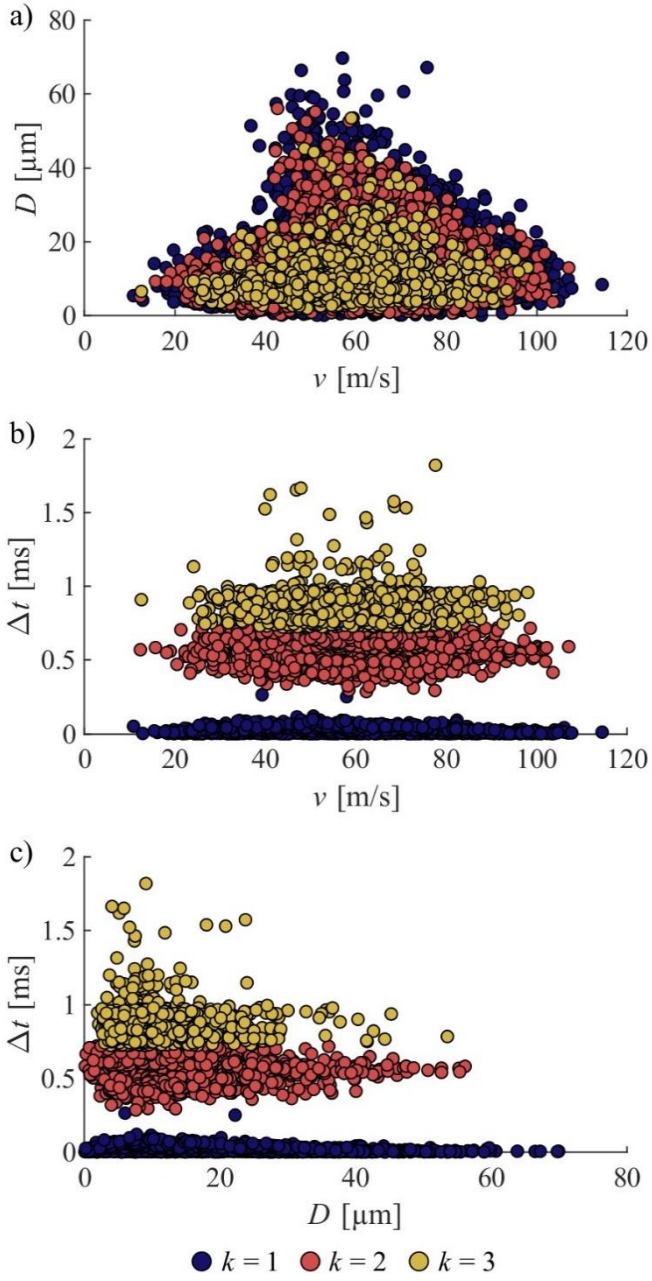

图15。 柴油在T_p = 25 °C、p_g = 0.3 bar、z = 20 毫米和x = 0 毫米条件下的液滴尺寸、速度和粒子间到达时间相关性：a）v–D相关性，b）v–Δt 相关性，以及 c）D–Δt 相关性。

图16展示了柴油在T_p = 25 °C、p_g = 0.3 bar、z = 20 毫米和x = 0 毫米条件下三个簇的箱线图。结果表明，对于D和v分布，各簇的统计量相似。此外，箱线图旁绘制的概率密度函数也相似；最小值和最大值的差异是由于R_k 的变化所致

簇以及数据的固有方差。在所有双簇和三簇数据集中均观察到了这一现象。

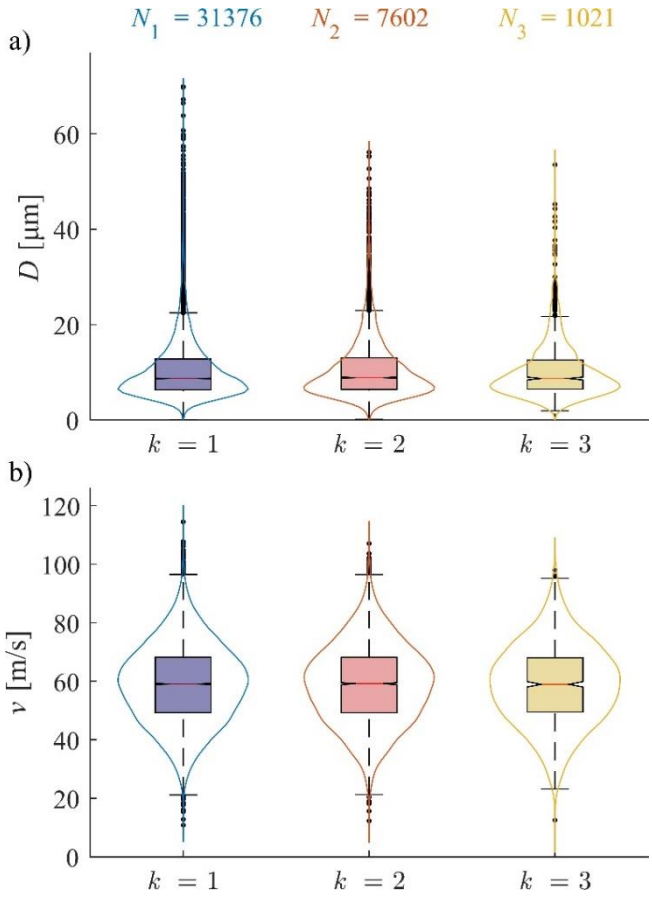

图14。柴油各簇的 a) 速度和 b) 尺寸分布的箱线图和概率密度函数

在 T_p = 25 °C、 p_g = 0.3 巴、z = 20 毫米和 x = 0 毫米处。

图16展示了按簇划分的*D*和*v*的平均值和标准差的径向分布。结果表明，不同簇的*D*和*v*统计量在径向位置上相同。这些结论适用于所有研究的测量参数和位置。X轴和Y轴的径向特征一致。因此，在每个喷雾位置，液滴簇的速度和液滴尺寸分布与完整实现的分布相匹配。因此，簇的动力学

行为可根据完整数据集的特征进行建模，同时考虑簇对应的R_k 以及其在喷雾中的(r, z)位置。

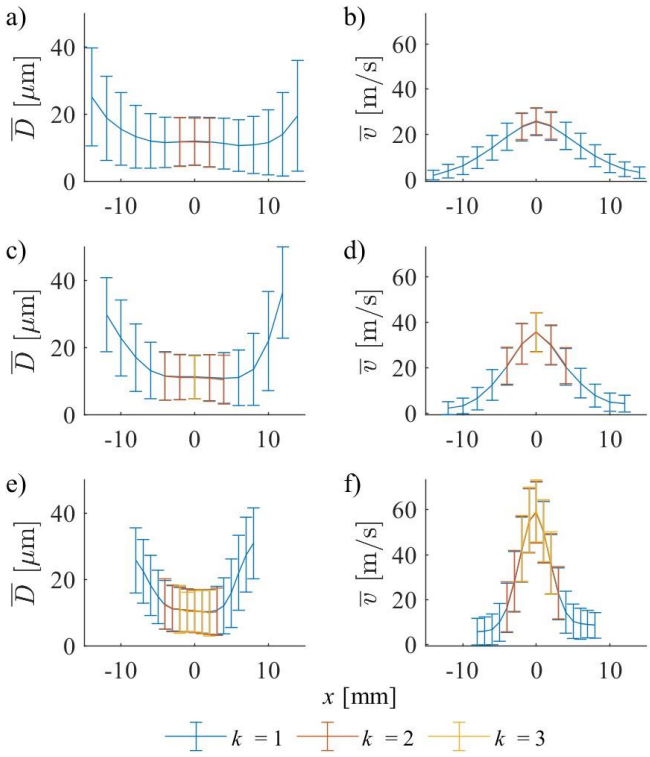

图16。 左列为不同下游距离处平均液滴尺寸的径向分布，右列为平均速度的径向分布：

a–b）z = 60 毫米，c–d）z = 40 毫米，e–f）z = 20 毫米。结果对应于在T_p = 25 °C和p_g = 0.3 bar条件下对柴油进行的测量。误差棒表示液滴尺寸和速度分布的标准差。

4. 结论

所介绍的聚类方法已应用于气动雾化器在广泛测量条件下获取的PDA数据：四种液体、五种预热温度、六种雾化压力，以及九十个不同喷雾位置，共计 10,800 个数据集。所提出的方法具有普适性，不受雾化参数和喷雾位置的影响：

- 聚类出现在$r = 0$ 毫米轴附近，这会显著扭曲Δt分布，使其偏离理论函数。在χ^2测试过程中，这些区域的测量点显示出较高的V值。

- 采用k-均值聚类后，可从实验数据集中剔除已确定的簇。在这些筛选后的案例中，V值降至~0.05以下，表明非定常行为实际上可以忽略。总之，在这些测量点，非稳态性由聚类效应引起。相比之下，在喷雾外围区域，非稳态性由混合和液滴夹带引起。

- 簇形成涉及数据集中相当大的比例（~30%）。这些数据集中的液滴有多达 40% 呈现聚类现象。因此，这一过程对建模具有显著影响。

- 簇的质心具有典型的粒子间到达时间值，如表 S1 和表 S3 所示。这些值与T_p无关，但取决于p_g、z和r。

- 簇的数量k取决于径向位置、轴向位置和雾化压力，与预热温度无关。

- 随着雾化压力升高，第一簇的液滴比例下降，而第二簇和第三簇的液滴比例上升。

- 柴油、LHO 和残渣油的结果相似，而对于水，聚类出现的频率较低，且簇的Δt_k值较低；这是因为水的表面张力几乎是其他液体的三倍。

- 在所有考察的参数下，液滴簇的速度和液滴尺寸分布均与完整实现的分布相符。因此，考虑到簇中相应的液滴比例，可以根据完整数据集的特征对簇的动力学行为进行建模。

假设额外簇叠加在准稳态过程之上，则可通过分别对各簇的行为进行建模，将不规则性纳入时间序列喷雾模型。因此，后续工作将进一步研究所确定簇的随机性和空间分布。

补充材料

Δt_k 和 R_k的更多相关统计量（如最小值、最大值、均值和标准差）可在补充材料中找到：两簇情况下见表 S1 和 S2，三簇情况下见表 S3 和 S4。

致谢

本项目得到匈牙利国家研究、开发与创新基金的资助，项目编号为 OTKA-FK 137758 和 NKKP ADVANCED 150696；同时获得匈牙利科学院亚诺什·博尧伊奖学金、大学研究奖学金计划（EKÖP-24–3-BME-155、EKÖP-25-3-BME-246）以及博士卓越奖学金计划（DKÖP-23–1-BME-55）的资助。上述奖学金计划由匈牙利文化与创新部国家研究、开发与创新基金和布达佩斯技术与经济大学资助，相关拨款协议由国家研究、开发与创新办公室签署。作者感谢捷克科学基金会项目（资助编号：25-17759S）以及“生物与仿生系统机械工程”项目提供的资金支持；后者由约翰·阿莫斯·夸美纽斯计划资助，项目编号为 CZ.02.01.01/00/22_008/0004634。

利益冲突声明

作者声明不存在需要披露的利益冲突。

数据可用性声明

支持本研究结论的数据已在 Zenodo 上公开，网址为 http://doi.org/10.5281/zenodo.17935932。

作者贡献

Erika Rácz：概念构思、方法设计、软件、验证、正式分析、数据整理、撰写初稿、可视化。**Milan Malý**：验证、调查、资源、数据整理、监督。**Jan Jedelský**：资源、监督、项目管理、经费获取。**Viktor Józsa**：概念构思、验证、撰写初稿、监督、项目管理、经费获取。

参考文献

[1] A.H. Lefebvre 和 V.G. McDonell，《雾化与喷雾》，第二版（CRC出版社，博卡拉顿，佛罗里达州，2017）。*2* K. Dhivyaraja、D. Gaddes、E. Freeman、S. Tadigadapa 和 M. V. Panchagnula，“喷雾中液滴尺寸与速度谱的动力学相似性和普适性”，《流体力学杂志》**860**，510–543（2019）。[3] F. Fröde、O. Desjardins、M. Bieber、M. Reddemann、R. Kneer 和 H. Pitsch，“同轴雾化器喷雾与混合物形成的多尺度模拟”，《国际多相流期刊》**182**（2024年8月），104971（2025）。[4] F. Doisneau、J. Dupays、A. Murrone、F. Laurent 和 M. Massot，“固体推进剂燃烧中非定常双向耦合聚并两相流的欧拉模拟与拉格朗日模拟”，《科学院学报：力学》**341**(1–2)，44–54（2013）。[5] A. Broatch、M. Carreres、J. García-Tíscar 和 M. Belmar-Gil，“通过欧拉-拉格朗日大涡模拟对贫燃直喷（LDI）燃气轮机燃烧室中的喷雾液体喷射进行谱分析和建模”，《航空航天科学与技术》**118**，106992（2021）。[6] S. Aggarwal、Y. Xiao 和 J. Uthuppan，“斯托克斯数对颗粒弥散的影响”，

《原子喷雾》**4**(2)，223–236（1994）。[7] E. Calvo、J.A. García、J.L. Santolaya、I. García 和 L. Aísa，“受迫射流中分散相的周期结构及其对颗粒弥散的影响”，《国际多相流期刊》**82**，119–142（2016）。[8] J. Jedelsky 和 M. Jicha，“起泡式雾化器：内部几何结构对雾化性能的影响；机械工程学院，布尔诺理工大学，布尔诺，捷克共和国”，1–6（无日期）。[9] J. Jedelsky、M. Maly、N. Pinto del Corral、G. Wigley、L. Janackova 和 M. Jicha，“压力旋流喷雾中的气液相互作用”，《国际传热传质期刊》**121**，788–804（2018）。[10] S.K. Sahoo 和 H. Gadgil，“旋流同轴喷注器自脉动状态下的大尺度非定常性及其对下游喷雾统计特性的影响”，《国际多相流期刊》**149**（1月），103944（2022）。[11] M.R. Barbieri、L. Achelis 和 U. Fritsching，“Y形射流喷嘴中蒸汽辅助油雾化的喷雾特性”，《国际多相流期刊》**181**（9月），105028（2024）。[12] M. Qenawy、J. Wang、J. Tian、B. Li 和 B. Chen，“低温流体喷雾与冷空气射流耦合的非定常流动行为研究”，《应用热工程》**235**（8月），121406（2023）。[13] M. Manish 和 S. Sahu，“空气辅助喷雾中的液滴聚集与局部喷雾非定常性”，《实验热流体科学》**100**（2018年3月），89–103（2019）。[14] C. Sun、Z. Ning、M. Lv、K. Yan 和 J. Fu，“气泡喷雾的声学与非定常性评估的时频分析”，《化学工程科学》**127**，115–125（2015）。[15] Y. Aradhey、C. Li 和 J. Meadows，“耦合液滴动力学：反应流场中声学-喷雾相互作用研究”，《燃烧与火焰》**250**，112645（2023）。[16] Q. Ye、O. Tiedje 和 J. Domnick，“液滴电荷对高速旋转杯喷涂的影响”，《静电学杂志》**134**（2024年12月），（2025）。[17] Z. PENG、B. ZHONG、X. CHEN 和 L. LI，“压力振荡对液体火箭发动机撞击射流雾化和喷雾燃烧的影响”，《中国航空学报》**38**(4)，103291（2025）。[18] Y. Huang 和 V. Yang，“贫燃预混旋流稳定燃烧的动力学与稳定性”，《能源与燃烧科学进展》**35**(4)，293–364（2009）。[19] Y. Kim、J.H. Kim、J. W. Han 和 J. Choi，“等离子喷涂过程中氧化钇薄膜形成的多尺度力学”，《应用表面科学》**572**（2021年9月），151416（2022）。[20] M. Ansaripour、R.A. Dafsari、S.H. Yu、Y. Choi 和 J. Lee，“农业喷洒无人机单转子产生的叶尖涡特性”，《实验热流体科学》**149**（3月），110995（2023）。[21] A. Fischer、U. Wilke、R. Schlüßler、D. Haufe、T. Sandner 和 J. Czarske，“扩展频率调制多普勒全局测速以研究非定常喷雾流”，《光学与激光工程》**63**，1–10（2014）。[22] K.D. Marx、C.F. Edwards 和 W.K. Chin，“理想相位多普勒系统的局限性：向空间和时间非均匀颗粒流的扩展”，《原子喷雾》**4**(1)，1–40（1994）。[23] C.F. Edwards 和 K.D. Marx，“理想喷雾的单点统计特性，第一部分：基本描述与导出量”，《原子喷雾》**6**(5)，499–536（1996）。[24] C.F. Edwards 和 K.D. Marx，“喷雾多点统计特性的理论与测量”，《喷雾燃烧最新进展》《喷雾、原子化、液滴燃烧现象》，33–56（1996）。[25] C.F. Edwards 和 K. D. Marx，“理想喷雾的多点统计结构，第一部分：基本概念与实现密度”，《原子喷雾》**5**(4–5)，435–455（1995）。[26] C.F. Edwards 和 K.D. Marx，“理想喷雾的多点统计结构，第二部分：利用粒子间时间分布评估稳态性”，《原子喷雾》**5**，457–505（1995）。

[27] J. Heinlein 和 U. Fritsching，“喷雾中的液滴聚集”，《实验流体力学》**40**(3)，464–472（2006）。[28] M. Liu、Y.F. Duan 和 T.N. Zhang，“使用相位/多普勒粒子分析仪评估起泡式雾化器内部设计对喷雾非稳态性的影响”，《实验热流体科学》**34**(6)，657–665（2010）。[29] J.T.K. Luong 和 P.E. Sojka，“气泡喷雾中的非稳态性”，《原子喷雾》**9**(1)，87–109（1999）。[30] J.T. Hodges 和 C. Presser，“压力雾化喷雾火焰中液滴到达统计的分析”，载于第二十五届燃烧研讨会，燃烧学会，（1994），第353–361页。[31] J. Jedelsky 和 M. Jicha，“气泡喷雾中的非稳态性：一种新的评估方法及运行条件的影响”，《原子喷雾》**18**，49–83（2008）。[32] A.S. Acharya、S. Deevi、K. Dhivyaraja、A.K. Tangirala 和 M. V. Panchagnula，“喷雾的时空微观结构：基于数据科学的分析与建模”，《流体力学杂志》**912**，1–27（2021）。[33] J. Heinlein、G. Schulte、U. Fritsching 和 R. Guardani，“利用神经网络绘制液体喷雾的结构”，《化学工程与加工：过程强化》**46**(12)，1357–1364（2007）。[34] A. Urbán、M. Malý、V. Józsa 和 J. Jedelský，“液体预热对高速气流喷雾雾化的影响：从水到粗菜籽油”，《实验热流体科学》**102**，137–151（2019）。[35] A. Urbán、B. Katona、M. Malý、J. Jedelský 和 V. Józsa，“简单射流气流喷雾雾化器中喷雾半锥角的经验关联式”，Fuel **277**(February)，118197（2020）。[36] A.M. Ikotun、A.E. Ezugwu、L. Abualigah、B. Abuhaija 和 J. Heming，“K均值聚类算法：全面综述、变体分析及大数据时代的进展”，Inf. Sci. (Ny). **622**，178–210（2023）。[37]“evalclusters - 评估聚类解决方案 - MATLAB”，（n.d.）。[38]“GapEvaluation - 间隙统计量聚类评估对象 - MATLAB”，（n.d.）。[39] J.M. Beér 和 N.A. Chigier，燃烧空气动力学（Robert E. Krieger Publishing Company，马拉巴尔，佛罗里达州，1983）。[40] E. Rácz、M. Malý、J. Jedelský 和 V. Józsa，“利用相位多普勒技术估算实际喷雾中的气相速度”，《国际多相流期刊》**157**(September)，（2022）。[41] A. Urbán、M. Zaremba、M. Malý、V. Józsa 和 J. Jedelský，“高速气流喷雾雾化中的液滴动力学与尺寸表征”，《国际多相流期刊》**95**，1–11（2017）。