

不同检测工况下PN快速检测适应性研究

沈 姝^{1,2}, 于全顺^{1,2}, 闫 峰^{1,2}, 高忠明^{1,2}, 张 超^{1,2}

¹中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津

²中国汽车技术研究中心有限公司, 天津

收稿日期: 2026年2月3日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月30日

摘 要

基于国内外典型的PN检测工况的调研研究, 分别在台架实验室和年检站场景下, 对比PN快速检测设备与基准设备在不同工况的适应性, 发现PN快速检测设备与PEMS设备的检测结果在CWTVC工况、实际路谱工况、CHTC工况以及自由加速法下具有良好的跟随性和一致性, 在稳态工况和加载减速法工况下, 数据一致性变差。且PN快速检测设备在车速较大的工况下以及PN结果值在 $10^3\#/cm^3$ 数量级时, 精度会变差。

关键词

颗粒物数量, 检测工况, 快速检测

Adaptability Study of PN Rapid Detection under Different Test Cycle

Shu Shen^{1,2}, Quanshun Yu^{1,2}, Feng Yan^{1,2}, Zhongming Gao^{1,2}, Chao Zhang^{1,2}

¹CATARC Automotive Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin

²China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin

Received: February 3, 2026; accepted: March 11, 2026; published: March 30, 2026

Abstract

Based on research into typical PN test cycle both domestically and internationally, comparative studies were conducted in both bench laboratory and annual inspection station settings to evaluate the adaptability of rapid PN detection equipment versus reference equipment under various test cycle. Findings indicate that rapid PN detection equipment demonstrates good tracking and consistency

with PEMS equipment results under CWTVC, PEMS, CHTC, and free acceleration test conditions. However, data consistency deteriorates under steady-state and lugdown test cycle. Furthermore, the accuracy of rapid PN detection equipment deteriorates under high-speed conditions and when PN results reach the 10^3 particles/cm³ order of magnitude.

Keywords

Particulate Number, Test Cycle, Quick Detection

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2025 年中国移动源环境管理年报显示, 2024 年, 全国汽车一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)、颗粒物(PM)排放量分别为 626.5 万吨、168.5 万吨、406.2 万吨、3.3 万吨。其中柴油车 PM 排放量占汽车排放总量的 90%以上[1]。柴油车颗粒物排放仍是监管的重点和难点。据研究, 国五柴油车, 若颗粒物捕集器(Diesel Particulate Filter, DPF)被异物撞击、人为损伤, 或被移除, 则单车的 PN (Particulate Number)排放可攀升 30 倍[2]; 同时, 欧六柴油车尾气排放颗粒物的典型粒径峰值普遍集中在 70~80 nm, 而国内现行的 GB3847-2018《柴油车污染排放限值及测量方法(自由加速法及加载减速法)》标准中规定的柴油车污染物排放检查为不透光烟度检查, 其适用粒径范围为大于等于 150 nm, 现有不透光烟度计检查的检测方法和灵敏度已不足以应对国五及以上排放阶段柴油车超细颗粒物的排放监管。且欧盟自 2018 年开展了欧VII排放标准的制订[3]-[6], 该标准基本延续欧VI排放限值, 但对 PN 提出了更高的要求, 测量颗粒物粒径从原先 23 nm 修改为 10 nm, 进一步提升了排放控制的严格性[7]。为了加强对超细颗粒物排放的控制, 美国、芬兰、日本、奥地利、德国、瑞士等多个国家的商业公司已开发了一系列 PN 检测仪, 并已经初步形成较为完善的测量方法和技术体系[7]。因此国内生态环境监管部门也在研究引入针对在用机动车 PN 排放检测技术, 以满足现有的排放升级的要求。而移动源 PN 排放快速检测替代传统的不透光烟度检测, 将成为在用车排放监管的首选。

而国内尚未制定 PN 快速测量方法和技术体系, 且欧洲提出的怠速工况是否适用也缺乏数据支持, 本文通过对国内外 PN 检测方法和检测原理的调研研究, 分别在实验室和年检站开展不同工况下的 PN 快速检测设备和基准设备的测试验证, 为 PN 快速检测方法和技术体系的建立提供支持。

2. PN 检测原理

2.1. 凝结核粒子计数器原理

凝结核粒子计数器(CPC)测量机动车 PN 主要有两步: 第一步, 样气从入口进入 CPC 后, 依次经过加热饱和器和冷却冷凝器, 完成凝结核增长的步骤, 此时颗粒物可增长至能够被基于光散射原理的颗粒物测量的装置探测到; 第二步, 颗粒物进入光学腔, 穿过具有一定能量的光束, 部分光会被颗粒物散射, 通过对粒子散射光的脉冲进行计数确定颗粒物的数量, 结合采样流量的大小可以计算出待测样气中颗粒物的数浓度[8]。CPC 原理是从 1980 年被首次开发后经过不断优化提升, 目前已经发展出了不同种类、不同性能的商用仪器, 如全流性 CPC、不同工作液 CPC、超低粒径 CPC 等[7]。

2.2. 扩散荷电原理

扩散荷电法原理是让颗粒物先带电，之后通过对颗粒物带电量的测量，以及最后检测到的电流值来反算颗粒物的数浓度。在该技术中，通过对颗粒的荷电量及对荷电颗粒电流的测量实现对颗粒数量浓度的测量。DC 原理的 PN 检测设备相较于 CPC 原理的设备具有成本低、结构简单且紧凑、耐用等特点。按照其荷电及电流测量方式可分为稳态扩散荷电(Steady-State DC, SSDC)、调制扩散荷电(Modulated DC, MDC)、调制沉积扩散荷电(Modulated Precipitation DC, MPDC) 3 种[7]，其中 SSDC 为传统的 DC 技术原理。为抑制或消除 SSDC 技术中电流零点漂移对结果的影响，提高设备的可靠性，在 SSDC 基础上发展形成 MDC 法，其通过脉冲式放电调节离子的生成过程，使连续流动中的颗粒依据脉冲频率周期性地被充电或保持电中性[7]。最后，为抑制或消除 SSDC 和 MDC 技术中颗粒荷电量、颗粒粒径分布对结果的影响，近年来发展出 MPDC 法[7]。

扩散荷电测量法与凝结核粒子计数法相比，无需工作液，具有更短的响应时间和更低的粒径检测下限，更加适合机动车排放超细颗粒物的快速、在线测量[8]。但是与 CPC 原理的仪器相比，扩散荷电法的测量准确性仍存在一定的差距，颗粒荷电、颗粒粒径分布及形貌等参量对测量结果均会造成影响[7]。

3. PN 检测方法调研

3.1. 国外 PN 快速检测方法

为了加强对机动车 PN 排放的控制，欧盟于 2011 年开始对柴油车 PN 进行监管。2012 年开始，荷兰的一些组织机构一直致力于开发一种新的颗粒测试方法，以验证 DPF 是否正常工作[9]。比利时 2022 年在 PTI 中引入 PN 检查，荷兰、德国和瑞士于 2023 年 1 月在 PTI 检查中实施 PN 检查，其限值及检查适用范围如下表 1 所示。瑞士的检测方法中除了设置通过/不通过限值外，还提出设定快速通过选项和快速不通过选项，主要为了缩短测试时间。快速通过选项通常为 PN 限值的 25%；快速不通过选项有助于快速完成判断[2]。

Table 1. PN detection limit [9] [10]

表 1. 国外 PN 检测限值[9] [10]

国家	生效日期	PN 限值
荷兰	2022.07 延迟至 2023.01	1,000,000 #/cm ³
比利时	2022.07	1,000,000 #/cm ³
德国	2023.01	250,000 #/cm ³
瑞士	2023.01	(1) 简易程序(低怠速)通过: <100,000 #/cm ³ (2) 正式程序(高怠速)通过: <250,000 #/cm ³

荷兰、比利时、德国和瑞士采用的 PN 快速检测方法不全相同，如下图 1 所示。荷兰和比利时采用的 PN 快速检测方法一致，均为怠速法稳定 15 秒，再测量 15 秒，取 15 秒的平均值判定结果。瑞士的 PN 快速检测方法与荷兰、比利时的差异在于采用了 15 秒高怠速的准备工况阶段，后续测试 5 秒，暂停 5 秒，总共测量 3 个 5 秒的测试，最终 15 秒的平均值判定检查结果。德国的 PN 快速检测方法较为复杂，需要先让转速超过 1000 r/min，以激活 EGR，怠速稳定 15 秒后，测量 30 秒，若 30 秒的平均值低于 5 万#/cm³，则车辆快速合格；若首个 30 秒测试，结果高于 5 万#/cm³，则再次测量 2 个 30 秒，取 90 秒的平均值判定检查结果。

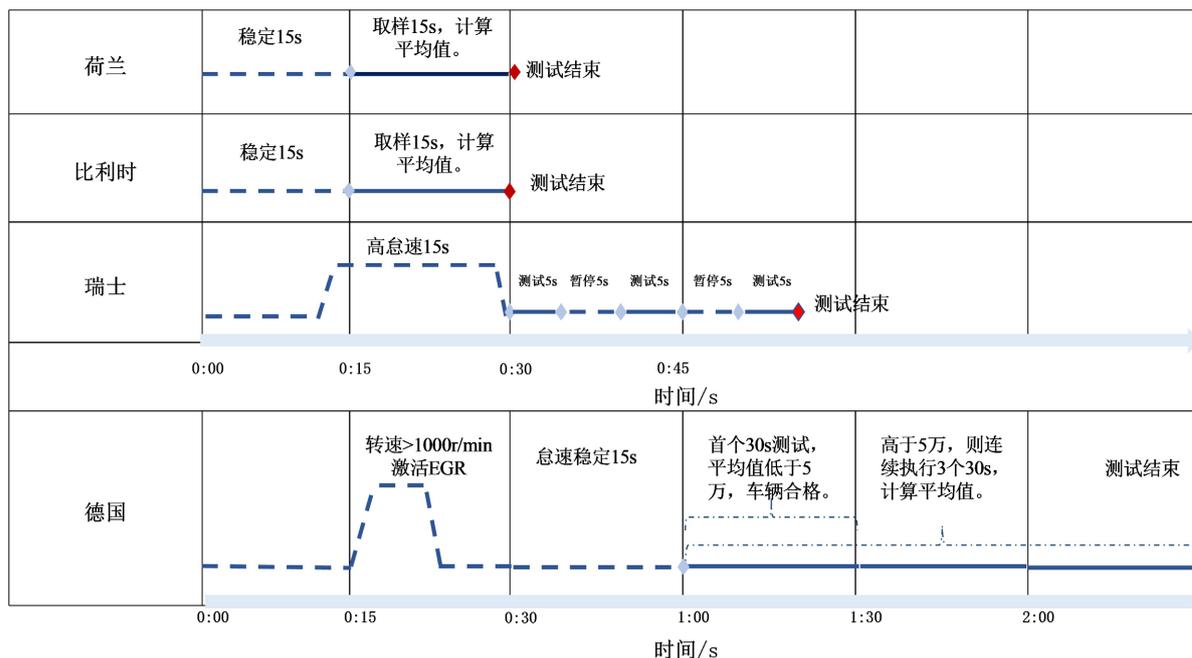


Figure 1. Rapid detection methods for PN abroad

图 1. 国外 PN 快速检测方法

据研究, 德国目前正研究讨论对 PTI 法规进一步修订, 因 DPF 的效率高达 97%, 而 GPF (Gasoline Particulate Filter) 的效率只有 90%, 故德国也在考虑将汽油车的 PN 监管也纳入 PTI-PN 测试范畴, 但怠速检测方法并不适用, 因此需要建立新的检测方法。

3.2. 国内 PN 检测方法调研

2018 年 6 月 22 日发布的《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》(GB 17691-2018) 排放标准, 规定了发动机标准循环下, 压燃式发动机在稳态工况(WHSC)和瞬态工况(WHTC)下的 PN 限值分别为 8.0×10^{11} #/kW·h、 6.0×10^{11} #/kW·h, 点燃式发动机在 WHTC 工况下 PN 限值是 6.0×10^{11} #/kW·h, 压燃式和双燃料重型柴油车整车排放 PN 限值为 1.2×10^{12} #/kW·h, 整车 PN 限值从国 6 b 开始实施[11]。2018 年 9 月 27 日发布的《柴油车污染排放限值及测量方法(自由加速法及加载减速法)》GB3847-2018 标准规定了柴油车污染物排放测量方法有自由加速法和加载减速法。

考虑到 PN 检测仪在汽车行业的广泛应用, 但国内缺乏相应的计量标准, 为了保证 PN 检测仪输出准确、可靠、有效的数据, 并对 PN 检测仪主要性能的技术指标进行统一、合理、符合实际的规定, 2025 年 3 月 27 日国家市场监督管理总局发布《移动源排放颗粒物数量检测仪校准规范》(JJF2215-2025), 校准项目主要有以下几项: 零点、流量示值误差、颗粒计数效率、颗粒计数线性、计数重复性、挥发性颗粒物的去除效率、颗粒浓度衰减系数等主要性能的校准方法和各项指标的要求、校准结果的判定等做了统一的规定, 同时对校准条件、校准仪器设备等也做了统一的要求[12]。

4. 实验方案及结果

4.1. 实验方案

为了验证 PN 快速检测方法的适用性, 上文对国内外现有的新车和在用车污染物排放检测方法进行了总结, 考虑到现行标准的延续性、沿用性, 本文拟依据 GB17691 和 GB3847 标准, 分别在实验室和年

检站场景下,对比 CWTVC 工况、等速工况、实际路谱工况、CHTC 工况以及自由加速法和加载减速法工况下,PN 快速检测设备的适应性,以及 PN 快速检测设备和实验室基准设备间的差异。

本次比对分别在两种测试场景下进行:一种测试场景为在台架上,采用一辆重型柴油牵引车作为颗粒物统一发射源,使用 PEMS 设备作为基准设备,测量原理为 CPC。车辆在重型车底盘测功机上运行,发动机尾气管连接 PEMS 设备排气流量计,将参与比对的 PN 快速检测设备采样探针插入排气流量计,使其采样口与 PEMS 设备 PN 采样口保持位置一致,PN 快速检测设备的原理为 DC;另外一种测试场景为在机动车年检站,采用一辆重型柴油车作为颗粒物统一发射源,使用 PEMS 设备作为基准设备,测量原理为 CPC。车辆分别在年检站转鼓和空地上运行,车辆排气管连接 PEMS 设备排气流量计,将参与比对的快速 PN 检测设备采样探针插入排气流量计,使其采样口与 PEMS 设备 PN 采样口保持位置一致,PN 快速检测设备的原理为 DC。如下表 2 所示,为 PEMS 设备与 PN 快速检测设备的技术参数对比。

Table 2. Technical specifications comparison

表 2. PN 检测设备技术参数对比

	PEMS 设备	PN 快速检测设备
技术原理	CPC	DC
粒径范围	23~1000 nm	23~25 um
量程	$0\sim5 \times 10^7 \text{ \#/cm}^3$	$0\sim5 \times 10^8 \text{ \#/cm}^3$
稀释倍数	10:1	10:1

4.2. 台架实验流程及结果

4.2.1. 台架实验流程

待测车辆在测功机上运转,见下图 2 场地布置示意图,具体流程如下:

1) 正式检测开始前,启动发动机,变速器置空挡,逐渐加大油门踏板开度;使用前进挡驱动车辆,使油门踏板处于全开位置时,测功机指示的车速最接近 70 km/h,但不能超过 100 km/h。

2) 检测开始后,在试验过程中,实时监控发动机冷却液温度和机油压力,一旦冷却液温度超出了规定的温度范围,或者机油压力偏低,暂时停止检测。冷却液温度过高时,检测员应松开油门踏板,将变速器置空挡,使车辆停止运转。

3) 检测过程中,时刻注意受检车辆或检测系统的工作情况。

4) 检测结束后,记录实验时间并保存数据。

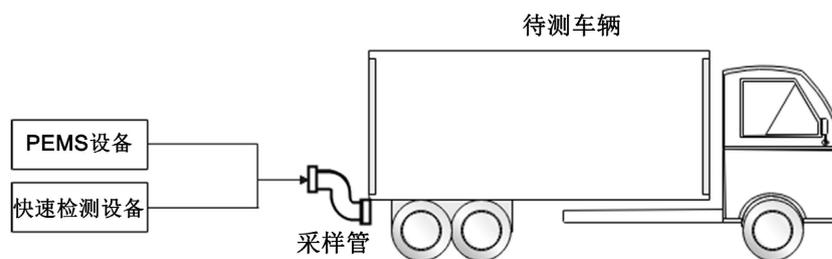


Figure 2. Site layout diagram

图 2. 场地布置示意图

5) 实验工况

实验工况如下图 3 所示,依次进行 CWTVC 工况、等速工况、实际路谱工况、CHTC 工况。

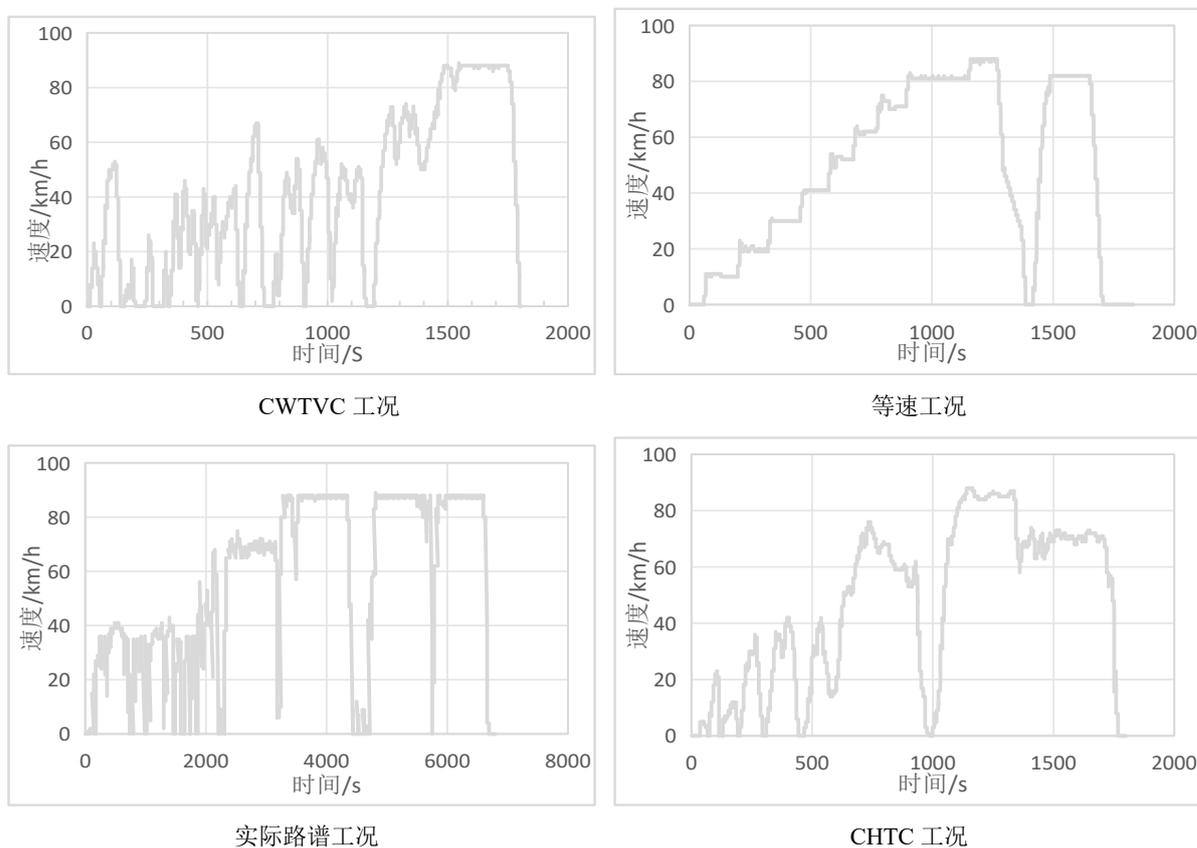


Figure 3. Laboratory bench test conditions

图 3. 实验室台架测试工况

4.2.2. 台架实验比对结果

台架实验室 PN 快速检测设备与 PEMS 设备测试验证比对结果如图 4~7 所示,同时计算不同工况下, PN 快速检测设备与 PEMS 设备结果的平均值偏差如表 3 所示。

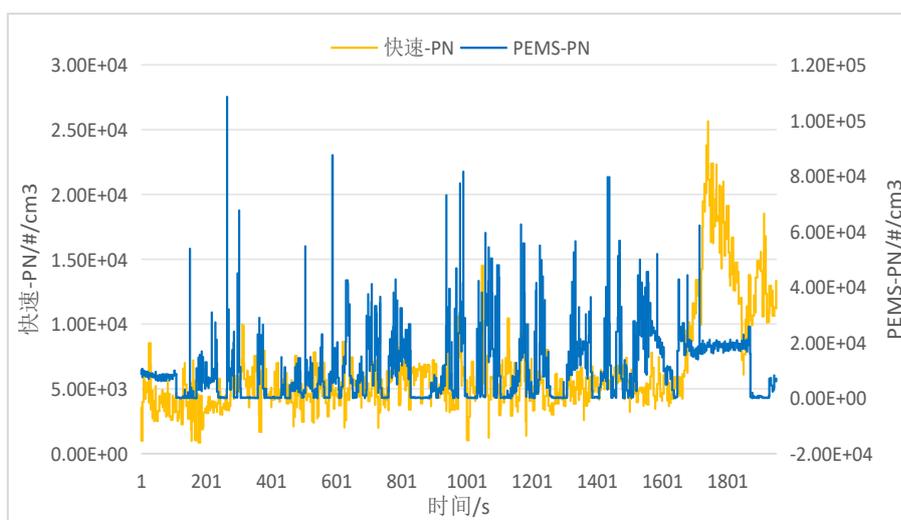


Figure 4. CWTVC comparison

图 4. CWTVC 工况比对

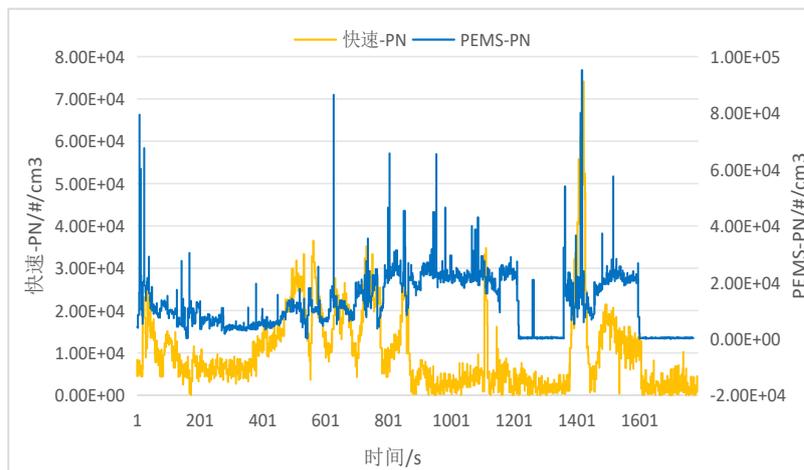


Figure 5. Constant speed comparison

图 5. 等速工况比对

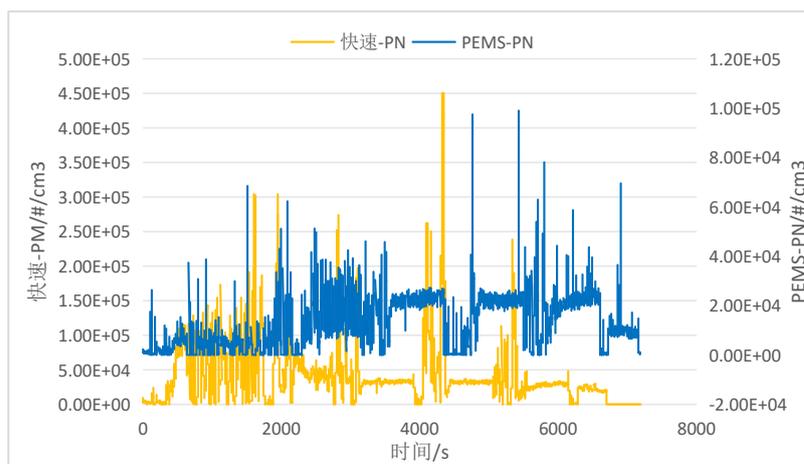


Figure 6. PEMS comparison

图 6. 实际路谱工况比对

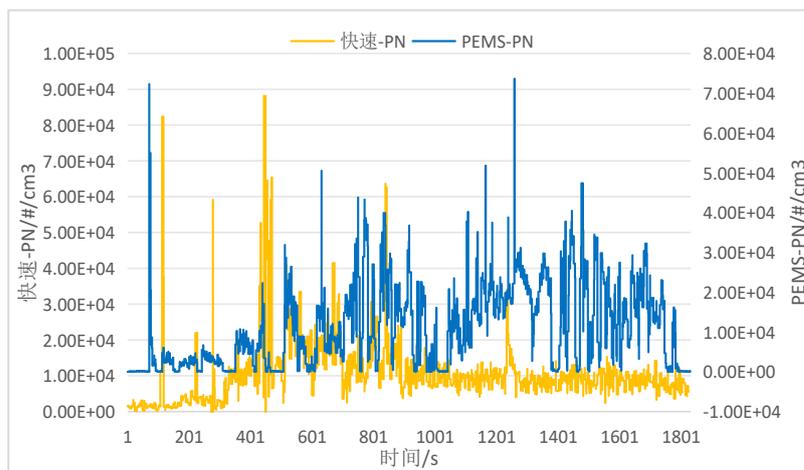


Figure 7. CHTC comparison

图 7. CHTC 工况比对

Table 3. Equipment concentration average deviation comparison
表 3. 设备浓度平均值偏差比对

工况	CWTVC 工况	等速工况	实际路谱工况	CHTC 工况
PEMS 设备	1.1E+04	1.2E+04	1.5E+04	1.1E+04
PN 快速检测设备	8.9E+03	1.0E+04	4.3E+04	1.3E+04
平均偏差%	-19.1	-17.9	191.0	18.2

可以发现，CWTVC 工况下，PN 快速检测设备与 PEMS 设备平均值偏差为-19.1%；等速工况下，PN 快速检测设备与 PEMS 设备平均值偏差为-17.9%；在实际路谱工况下，PN 快速检测设备与 PEMS 设备偏差为 191.0%；CHTC 工况下，浓度平均值偏差为 18.2%。实际路谱工况下，PN 快速检测设备瞬态响应与 PEMS 设备较一致，但是平均浓度偏差较大，PN 快速检测设备可能需要针对此车型进行标定。

4.3. 年检站实验流程及结果

4.3.1. 年检站实验流程

依据 GB3847-2018 标准中自由加速法和加载减速法要求，开展 PN 快速检测设备与 PEMS 设备的比对测试，本次比对总共采样 6 辆柴油车，其中 4 辆柴油车(其中，国 V 车辆 2 辆，国 VI 车辆 2 辆)采用自由加速工况，另 2 辆国 V 柴油车采用加载减速工况检测。场地布置图如图 2 所示。

4.3.2. 年检站实验比对结果



Figure 8. Comparison of free acceleration cycle
图 8. 自由加速工况比对

年检站 PN 快速检测设备与 PEMS 设备比对试验结果如下图 8~10 所示。可以看出, PN 快速检测设备的结果值整体高于 PEMS 设备。自由加速工况下, 国 V 车辆 1 和车辆 2 的 PN 检测结果在 10^7 #/cm³ 数量级, PN 快速检测结果与 PEMS 检测结果跟随性和数量级较一致; 国 VI 车辆 3 的 PN 检测结果在 10^4 #/cm³ 数量级, PN 快速检测结果与 PEMS 检测结果跟随性有所变差, 车辆 4 当 PN 结果 10^3 #/cm³ 数量级时, 检测结果间的跟随性进一步恶化。

在加载减速工况下, 如图 9 和 10 可以看出, 车辆 5 和车辆 6 的 PN 快速检测结果与 PEMS 检测结果没有明显的跟随趋势。

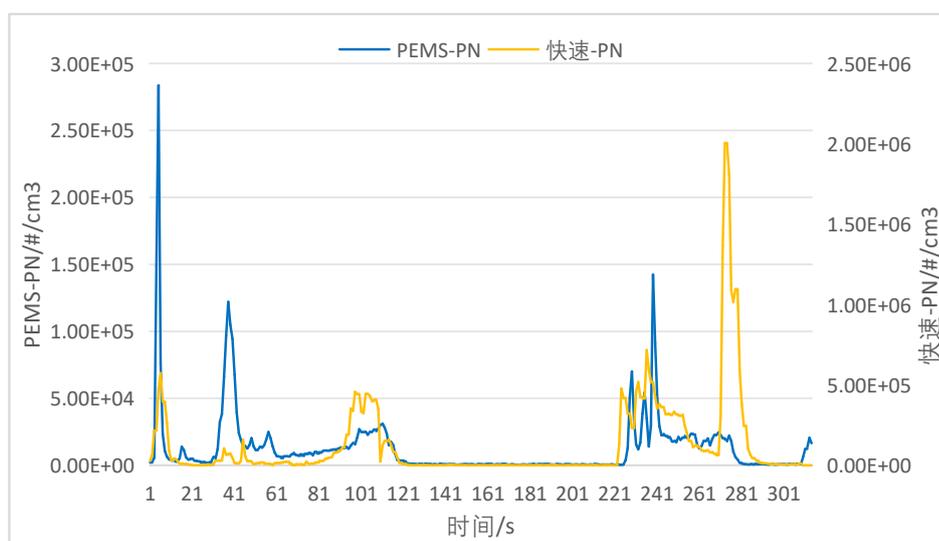


Figure 9. Comparison of vehicle 5 lugdown cycle
图 9. 车辆 5 加载减速工况比对

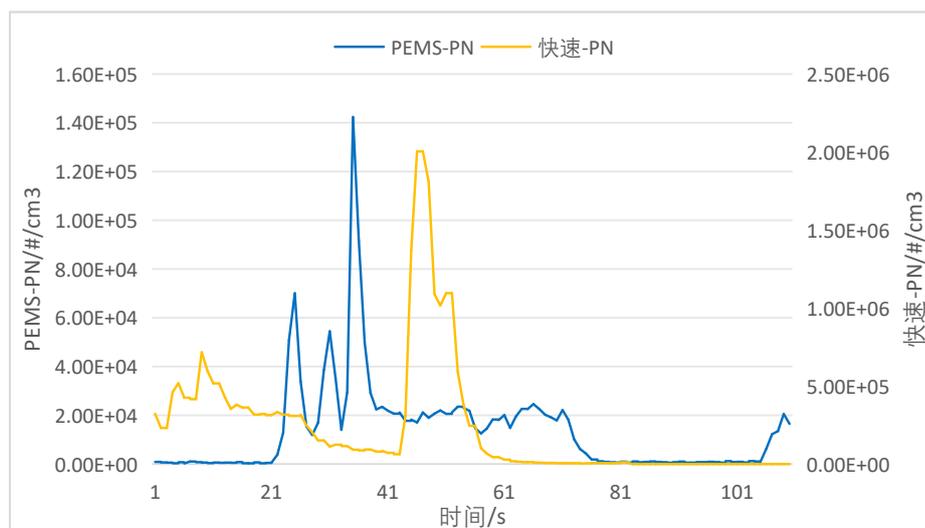


Figure 10. Comparison of vehicle 6 lugdown cycle
图 10. 车辆 6 加载减速工况比对

经过上述台架实验室和年检站的比对测试, 发现:

(1) PN 快速检测设备相较于 PEMS 设备, 具有便携, 预热速度快, 功率小, 快速机动的使用特性,

适用于快速 PN 检测项目。

(2) 但是, PN 快速检测设备也存在一定的问题: 一是 PN 快速检测设备在车速较大的工况下存在数据精度下降的问题, 可能是高速工况排气背压影响采样泵及分析仪工作导致; 二是在 PN 结果值在 10^3 #/cm³ 数量级时, PN 快速检测设备的响应变差; 三是 PN 快速检测设备实际使用过程中稳定性相对较差。

5. 结论

本文研究对比了国内外 PN 检测工况、技术原理及设备, 分别在台架实验室和年检站场景下, 对比 CWTVC 工况、等速工况、实际路谱工况、CHTC 工况以及自由加速法和加载减速法工况下, PN 快速检测设备的适应性, 以及 PN 快速检测设备和基准设备间的差异, 发现:

(1) PN 检测工况的适应性方面: PN 快速检测设备与 PEMS 设备检测结果在 CWTVC 工况 CHTC 工况以及自由加速法下具有良好的跟随性和一致性, 在稳态工况、实际路谱工况、和加载减速法工况下, 数据一致性较差。

(2) PN 快速检测设备性能方面: PN 快速检测设备在车速较大的工况下、PN 结果值在 10^3 #/cm³ 数量级时, 会存在响应和精度变差的情况, 且设备实际使用过程中稳定性相对较差。

但整体来说 PN 快速检测设备具有一定的工况适应性, 待优化完善后, 可以满足不同工况的检测需求以及监管需要。

参考文献

- [1] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报[R]. 2025.
- [2] 钱国刚, 窦燕涛, 沈姝. 基于 PN 值的汽车颗粒捕集器移除破损检测[J]. 北京汽车, 2023(2): 1-6.
- [3] Giechaskiel, B., Melas, A., Martini, G., *et al.* (2021) Overview of Vehicle Exhaust Particle Number Regulations. *Process*, **9**, Article 2216. <https://doi.org/10.3390/pr9122216>
- [4] Kontses, A., Triantafyllopoulos, G., Ntziachristos, L., *et al.* (2020) Particle Number (PN) Emissions from Gasoline, Diesel, LPG, CNG and Hybrid-Electric Light-Duty Vehicles under Real-World Driving Conditions. *Atmospheric Environment*, **222**, Article 117126. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117126>
- [5] Dimaratos, A., Toumasatos, Z., Triantafyllopoulos, G., *et al.* (2020) Real-World Gaseous and Particle Emissions of a Bi-fuel Gasoline/CNG Euro 6 Passenger Car. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **82**, Article 102307. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102307>
- [6] Toumasatos, Z., Kontses, A., Doulgeris, S., *et al.* (2021) Particle Emissions Measurements on CNG Vehicles Focusing on Sub-23nm. *Aerosol Science and Technology*, **55**, 182-193. <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1830942>
- [7] 刘俊杰, 肖骥, 刘悦, 陈金场. 移动源排放颗粒浓度检测仪的研究技术现状[J/OL]. 大气与环境光学学报, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/34.1298.O4.20250513.1224.014>, 2025-05-13.
- [8] 康士鹏, 余同柱, 桂华侨, 等. 机动车排放超细颗粒物在线监测技术研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2020, 15(6): 413-428.
- [9] 沈姝, 等. 在用车 PN 快速检测可行性研究[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(5): 1119-1126.
- [10] Joint Research Centre of EC (2022) Periodic Technical Inspection: Particle Number (PN) Measurements, Informal Document GRPE-86-30 for GRPE. <https://unece.org/sites/default/files/2022-05/GRPE-86-30e.pdf>
- [11] 生态环境部. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段): GB 17691-2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [12] 全国法制计量技术委员会机动车检验检测分技术委员会. 移动源排放颗粒物数量检测仪校准规范: JJF 2215-2025 [S]. 北京: 质检出版社, 2025.