

© 2025国际清洁交通委员会 (ID 330)

电动客车燃油加热器排放: 中国厦门测试案例

作者:毛世越、Felipe Rodríguez

背景

当前,电动客车因其性能高效且环境友好,正在成为全球各国公交车队的常见配置选择。不过,在一些气候较为寒冷的地区,电动客车的运营或面临着更多挑战。低温环境会降低电池性能,对电池本身进行加热和向车厢供暖都需要消耗大量电力,这会影响到电动客车的续驶里程和运营效率。根据国际清洁交通委员会(ICCT)此前的分析研究,在气温低至-20°C的情况下,车厢供暖的能耗甚至可高达车辆总能耗的50% (Mao et al., 2023b)。

在中国北方地区,冬季气温可低至-20°C,在这种情况下,电动客车运营商和车 队管理者通常会选择安装辅助加热设备,称为燃油加热器(FFH),以最大化保持电 动公交客车和长途客车的续驶里程。作为独立的加热系统,燃油加热器可为乘客舱 供暖,而不需要消耗电池电力(详见图1)。燃油加热器通过燃烧柴油或汽油来产生 热能,从而提升车辆的冬季运营效率并改善整车的耐久性。但与此同时,燃油加热 器本身也是一种排放源,且许多加热器并未配备柴油颗粒物捕集器(DPF)等后处 理系统。

www.theicct.org.cn

communications@theicct.org

@theicct.org



鸣谢:本研究由能源基金会慷慨支持。作者在此特别感谢来自厦门环境保护机动车污染控制技术中心的侯攀先生 和赖益土先生为本次研究提供技术指导并协助进行测试。另外感谢ICCT内部同事周圆融和Helmer Acevedo, 两位为本文提供了建设性意见。本文所呈现的内容不代表能源基金会或厦门环境保护机动车污染控制技术中心 的任何观点。

图1 燃油加热器的内部结构



来源: Chong (2019), 经允许后使用。

中国、欧盟以及美国加州目前均已针对燃油加热器的污染物排放制定了相关标 准(详见表1)。中国和欧盟在测试规程上对每种污染物设定了百万分之含量(ppm) 限值,而加州的法规则按每英里平均排放量进行测定。这些标准涵盖了氮氧化物 (NO_x)、一氧化碳(CO)、总碳氢化合物(THC)、非甲烷有机气体(NMOG)等污 染物。不过,这些法规标准的限值相对宽松,且目前尚无任何针对尾气后处理系统 的强制性要求。此外,现行标准也未涵盖固体颗粒物(SPN/PM)或加热器排放的 温室气体,如二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)。在中国,燃油加热 器排放标准目前属于行业推荐性标准,并非强制性的国家法规。

表1 中、美、欧三地燃油加热器标准的管理范围及限值

	中国 JB/T 8127-2021	加州 LEV II ULEV	欧盟 EU R122
NO _x	< 100 ppm	< 0.05 g/mi	< 200 ppm
со	< 300 ppm	< 1.7 g/mi	< 1,000 ppm
нс	< 5 ppm		< 100 ppm
甲醛		< 0.008 g/mi	
NMOG		< 0.04 g/mi	
РМ			烟度值 < 4 (Bacharach 烟度法)

燃油加热器的排放问题是一个新兴的研究领域。环保组织CALSTART在2021 年开展的相关研究中 (Sutton et al., 2021) 收集了来自三家制造商的电动客车的

燃油加热器排放数据,发现其平均一氧化碳(CO)和氮氧化物(NO_x)排放均低于 加州LEV II ULEV标准限值。不过,加州的管理标准仅适用于安装在柴油车上的燃 油加热器,目前尚无针对电动客车燃油加热器的相关法规。CALSTART在报告中 建议对燃油加热器的排放进行标准化测试并要求报告测试结果,以便为未来的政策 制定提供参考,并支持电动客车的发展。

2023年在加拿大进行的一项测试表明, 燃油加热器的一氧化碳 (CO) 和非甲 烷有机气体 (NMOG) 排放大致符合加州的排放标准, 但氮氧化物 (NO_x) 排放则超 出了限值 (Humphries et al., 2024)。该研究还将道路实测数据与欧盟标准进行 了比较, 发现一氧化碳 (CO) 和碳氢化合物 (HC) 排放显著高于规定限值, 特别是在 冷启动阶段, 不过高排放阶段持续时间较短。

尽管近年来中国电动公交客车和长途客车市场发展迅速,但目前尚无公开研究 对安装在电动客车上的燃油加热器进行排放测试和分析。本次研究旨在填补这一空 白,研究将重点关注低温条件下的排放表现以及一系列尚未受到国家或地区法规监 管的污染物(包括温室气体和颗粒物)。本次研究的目标是提供量化数据,为未来的 政策制定提供参考。

方法论

本文分析了燃油加热器在一系列温度条件下的功能性和排放表现,这些温度范 围涵盖了实际运行中可能遇到的典型及极端工况。测试工作由厦门环境保护机动车 污染控制技术中心实施完成。

测试方案

本次测试在20°C、-7°C和-20°C三种温度条件下进行。尽管通常来说, 燃油 加热器不会在20°C的环境下运行, 但由于制造商在该温度下进行的燃油加热器排 放校准, 因此我们将20°C也纳入了测试范围。选择-7°C是因为这是中国北方大多 数地区冬季的典型气温, 而选择-20°C则是为了探索燃油加热器在极端条件下的运 行表现。

表2提供了测试设置的相关信息。在测试过程中,车辆分别在怠速状态和行驶 状态下运行。然而,测试前的校准试验表明,车辆的运行状态其实并不会影响燃油 加热器的排放、燃油消耗或加热功率。因此,在-7°C和-20°C条件下,采用怠速状 态进行测试是合理可行的。在行驶状态下,车辆按照CHTC-B行驶工况运行,该工况 是中国重型商用车测试循环中应用于城市公交客车的标准化测试循环。本次测试测 量的污染物包括:一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO₂)、氮氧化物(NO_x)、总碳氢化 合物(THC)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)以及固体颗粒物(SPN)。非甲烷有机 气体(NMOG)的排放量是通过从总碳氢化合物(THC)中扣除甲烷(CH₄)的浓度 来进行估算的。

表2 测试设置

温度	车辆状态	加热器工作模式	测试工况	测试次数	测定污染物			
20 °C	怠速	启动除霜和除雾,最大风量。	固定测试 (水温达到85 °C 时, 加热器关闭。)	2				
	行驶	启动除霜和除雾,最大风量。]除霜和除雾,最大风量。 测试工况:CHTC-B 3		污染物: NO _x 、CO、THC、			
		启动除霜和除雾,中等风量。	测试工况:CHTC-B	1	SPN ₁₀ / SPN ₂₃			
-7 °C	怠速	启动除霜和除雾,最大风量。	固定测试 (水温达到85 °C 时, 加热器关闭。)	3	温至 ┐14: CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O			
-20 °C	怠速	启动除霜和除雾,最大风量。	固定测试 (如水温无法达到 85 °C, 则加热器需至少运 行1小时。)	3				

测试用车辆及燃油加热器

本次参与测试的车辆是一款在中国市场上常见的金龙牌客车(图2),配备的燃油加热器由河北宏业永盛汽车加热器股份有限公司提供(图3)。该燃油加热器的生产时间距测试时间不超过6个月,额定加热功率为35千瓦。表3展示了车辆及所用加热器的详细技术参数。

图2 本次研究使用的测试车辆



摄影: 毛世越

图3 本次研究测试车辆装备的燃油加热器



摄影:毛世越

表3 测试车辆及燃油加热器产品规格

车辆	品牌	金龙
	型号	XMQ6112AYBEVL05
	车辆总质量	18,000 kg
	准乘人数	52
	最大输出功率	360 kW
	电池容量	560 Ah
	制造商	河北宏业永盛汽车加热器股份有限公司
	使用时间	6个月内
	供热方式	液循环系统
	燃料类型	柴油
	输出功率	165 W
	制热功率	35 kW
	能源输入类型	电池
加热器	额定电压	24 V
	温度控制方式	水温达到85°C时加热器关闭; 温度降至65 °C时加热器重新 开始制热。
	供暖区域	车厢加热和前挡风玻璃除霜。
	燃油消耗量	3.6 kg/h 或 4.24 L/h
	气泵流速	5,000 L/h
	产品重量	28 kg
	安装	厂商安装

测试设备设置

本次测试共使用了三台HORIBA OBS-ONE便携式排放测量系统 (PEMS), 用于测量燃油加热器运行状态下排放的各项污染物。其中,一台设备用于测量总碳 氢化合物 (THC)、氮氧化物 (NO_x)、一氧化碳 (CO)、二氧化碳 (CO₂)以及直径大 于23纳米的固体颗粒物 (SPN₂₃);另一台用于测量直径大于10纳米的固体颗粒物 (SPN₁₀);第三台则用于测量甲烷 (CH₄)和氧化亚氮 (N₂O)。图4展示了测试设备 和采样点的设置方式,为了提高测试精度,测试团队对第一台PEMS设备的SPN₂₃ 探针进行了特别设置,以避免采样管道中产生进一步的冷凝。测试设备由厦门环境 保护机动车污染控制技术中心提供,设备技术参数详见表4。

图4 测试设备和采样点



表4 HORIBA OBS-ONE便携式排放测量系统 (PEMS) 的规格

污染物/ 度量衡	方法	范围	精准度
со	加热型非分散红外	0-10 vol%	±0.3%FS (满量程) 或 ±2.0%RS (读数)
CO2	加热型非分散红外	0-20 vol%	±0.3%FS 或 ±2.0%RS
NOx	加热型化学发光检测器	0-3,000 ppm	±0.3%FS 或 ±2.0%RS
тнс	火焰离子化检测器	0-10,000 ppm	±0.3%FS 或 ±2.0%RS
CH4	量子级联激光器	0-2,000 ppm 和 0-10,000 ppm	±0.3%FS 或 ±2.0%RS
N ₂ O	量子级联激光器	0-1,000 ppm	±0.3%FS 或 ±2.0%RS
SPN ₂₃	冷凝粒子计数仪	23 nn-1 um, 0-5×10 ⁷ #/cm ³	±10%RS
SPN ₁₀	冷凝粒子计数仪	10 nn-1 um, 0-5×10 ⁷ #/cm ³	±10%RS
流速	皮托管差压测量	0-15 m³/min	±0.3%FS 或 ±2.0%RS

主要发现及讨论

CO₂/vol%

CH₄/ppm

N₂O/ppm

SPN₂₃/(#/cm³)

NMOG/ppm^a

表5总结了本次排放测试的结果。随着温度下降,一氧化碳(CO)浓度会有所上升,这是由于加热器中的柴油在低温条件下无法充分燃烧,导致燃烧效率降低。出于同样的原因,氮氧化物(NO_x)浓度也随着温度的降低而有所增长。

温室气体 (CO₂、CH₄和N₂O) 的排放在测试过程中并未受到温度的显著影响。不过,由于燃烧室内的氧气浓度较低,燃烧效率下降,导致温室气体和其他污染物 (如SPN₂₃) 的排放有所增加。在有机化合物排放方面 (即非甲烷有机 气体,NMOG),可通过总碳氢化合物 (THC) 和甲烷 (CH₄) 之间的差值来估算 (NMOG ~ THC - CH₄)。不过,由于在极低温条件下使用测试设备存在一些不可 避免的局限性,有机化合物在到达气体分析仪之前就已在采样系统中发生了冷凝。 因此,我们仅报告了在20 °C条件下的测量数据。

	20 °C	-7 °C	-20 °C
NO _x /ppm	80.6/86.2	94.1/102.5	96.2/134.5
CO/ppm	53.4/1,076	59.7/1,292.7	132.6/36,858.5

9.4/10.7

1.2/11.2

0.1/0.9

3×10⁶/2.8×10⁷

9.6/14.1

1.5/594.3

0.3/1.3

6.3×10⁵/5.8×10⁶

9.3/10.6

1.9/6.4

0.2/0.6

4.8×10⁵/8.7×10⁶

37.1/92.0

表5 不同温度条件下燃油加热器排放的测试结果(数据格式:稳态均值/测试中出现的最高值)

^a 由于设备设置方面的局限性, 在低温环境下, 有机化合物在到达采样系统之前就可能会发生冷凝, 因此这部分测 试数据并没有纳入报告范围。

中国、欧盟和加州的法规在管理策略上有所不同,主要体现在所监管的污染物 种类和限值单位(如ppm、g/mi或mg/kWh)方面,因此三地间的燃油加热器排 放数据并不具有直接可比性。尽管如此,我们仍将本次测试的结果与上述三项燃油 加热器排放管理法规及中国重型商用车国VI排放标准(GB 17691-2018,以下简称 国VI标准)下的污染物排放限值分别进行了比对(图5)。需要特别说明的是,国VI 标准是针对重型车的排放标准,而非专门针对燃油加热器排放的管理法规。欧盟的 R122标准和国VI标准监管的是整个测试过程中的排放峰值,而其他法规则是基于 平均值设定的管理限值。

从本次测试的结果来看, 冷启动条件下测量出的氮氧化物 (NO_x) 和一氧化碳 (CO) 排放大多超出了加州LEV II ULEV标准限值。在极寒条件 (-20°C) 下测量 出的一氧化碳 (CO) 排放比欧盟标准限值高出30倍以上。在不同的温度条件下, 测 量出的固体颗粒物 (SPN) 排放水平超出国VI标准限值200%至300%, 这表明电动 客车上装备的燃油加热器会比具有类似功率配置的内燃机车辆产生更高的颗粒物 排放。在氮氧化物 (NO_x) 和非甲烷有机物 (NMOG) 方面, 燃油加热器的排放分别 约为国VI标准限值的40%和69%。从这些比对结果来看, 可能需要额外的监管法规 来控制燃油加热器产生的污染物排放。





■ 20 °C ■ -7 °C ■ -20 °C

注: 欧盟的R122标准和国VI标准 (GB17691-2018) 监管的是整个测试过程中的排放峰值, 而其他法规则是基于 平均值设定的管理限值。

国际清洁交通委员会 THEICCT.ORG.CN

为了评估电动客车运行及其燃油加热器所产生的二氧化碳排放总量,我们在本次分析中采用了表6所列出的假设条件。针对车辆排放部分,我们假设该客车每天运行12小时,行驶里程180公里,这一数值是中国城市公交客车和长途客车的平均行驶 里程(Mao & Rodriguez, 2024)。此外,我们从ICCT此前相关研究中引用了不同 温度条件下的客车平均能耗数据(Mao et al., 2023a)。评估采用的电网排放因子 来源于中国生态环境部2025年发布的最新信息。针对燃油加热器排放,我们采用 的二氧化碳排放因子是通过实际测试得出的。

表6 评估CO,排放的假设条件

客车	温度 (° C)	20	-7	-20	
	行驶里程 (km/天)	180	180	180	
	能耗 (kWh/100 km)	65.4	85.02	98.1	
	运行时长 (h)	12	12	12	
	电网排放因子(kg/kWh)	0.6205	0.6205	0.6205	
	CO ₂ 排放 (kg/天)	69.9	90.9	104.9	
燃油	排放因子 (kg/100km)	46.4	53.1	56.0	
加热器	CO ₂ 排放 (kg/天)	83.5	95.6	100.8	
燃油加热器排放占比		53%	50%	48%	
CO ₂ 排放总量 (kg/天)		156.6	190.6	210.5	

图6展示了电动客车自身能耗及其所装备的燃油加热器产生的二氧化碳排放情况。如图所示,二氧化碳排放总量在20°C条件下为每天153.5kg,当温度降至-20°C时,排放会增至205.8kg。随着温度的下降,燃油加热器排放在二氧化碳

排放总量中的占比会从20°C时的54%降至-20°C时的49%,这一比例的下降反映 出在极寒天气条件下,车辆本身的能耗增加导致车辆二氧化碳排放显著上升。

燃油加热器也会产生较高的二氧化碳排放,在20°C条件下为每天83.6kg, 在-20°C条件下会升至100.9kg,但由于排放总量的上升趋势更为显著,其在排放 总量中的占比随着温度降低会略有下降。但总体而言,无论在哪种温度条件下,燃 油加热器始终是一项重要的二氧化碳排放源,说明这种通过燃烧燃油供热的技术 设备仍存在燃烧效率方面的改善空间,且相关研究表明,即使在较温和的气候条件 下,采用热泵等新技术也有望显著减少燃油加热器的排放(Mao et al., 2023b)。 虽然在20°C的环境条件下很少会使用燃油加热器,但本次测试的结果仍表明,燃 油加热器可能会成为二氧化碳排放和尾气污染物的一项重要排放源。





研究文献比对

我们将本次研究的测试结果与其他研究文献中的结果进行了汇总对比(详见表 7)。在本研究中,所测试的燃油加热器的燃油消耗率为4.24 L/h,其二氧化碳排放 水平要高于其他研究中测试的燃油加热器。燃油能效值方面的差异也表明,一些燃 油加热器制造商仍有改进其产品燃油能效和二氧化碳排放性能的空间。此外,从各 项研究的排放结果对比中还能看出,排放测试结果的差异范围较大,尤其是在氮氧 化物和一氧化碳排放方面。

表7 本次研究与同类研究文献的测试结果汇总

斑肉话曰	年份	温度	N	NO _x CO		油耗		CO2		关书文社	
听 无坝日		°c	g/mi	g/h	g/mi	g/h	L/100 km	L/h	g/mi	g/h	沙 与入脉
Diesel fuel-fired heater emissions	2024	3.4	0.34	3.85	0.05	0.99	9.00	1.78	377.00	4,689.00	Humphries et
in real-world conditions	2024	-1.5	0.34	4.21	0.08	1.90	9.10	2.00	382.00	5,233.00	al. (2024)
Fuel-fired heaters: Emissions, fuel utilization, and regulations in battery electric transit buses	2021		0.03		0.11						Sutton et al. (2021)
Testing method for electric bus auxiliary heater emissions	2023	-20		4.20		7.50		1.90		5,900.00	Pettinen et al. (2023)
Measurement of emissions from diesel fired heaters for buses	2018			9.70		4.40					Bræstrup (2018)
+770	2024	-7	0.93	8.36	0.42	3.73		4.24	854.90	8,111.70	
半 町九	2024	-20	0.91	9.81	1.95	17.12		4.24	902.45	8,562.87	

结论

本文分析了安装在中国主流客车车型上的燃油加热器所产生的尾气和温室气体排放。目前,全球范围内对燃油加热器的监管大多是在内燃机的排放管理框架下,仍有一些排放污染物尚未纳入监管范围,部分地区的标准也未涵盖颗粒物及二氧化碳、甲烷等温室气体。这意味着,作为一项排放污染源,燃油加热器的环境影响可能被低估。

本次测试发现,低温条件会加剧燃油加热器燃烧不充分的问题,从而导致颗粒物和碳氢化合物排放显著上升。此外,本次研究还发现燃油加热器的颗粒物排放水平非常高,超过柴油车国VI标准限值的三倍以上。

目前,对燃油加热器的排放控制主要针对氮氧化物和一氧化碳,但此次测试发 现燃油加热器的颗粒物 (SPN₂₃和SPN₁₀)和非甲烷有机气体 (NMOG) 排放也不容 忽视,且存在多项污染物排放高于柴油车尾气排放法规限值的现象。这种情况或会 削弱电动客车的环境优势。因此,应考虑对现行的燃油加热器排放标准进行扩展, 纳入更多污染物限值要求。

在本测试中,燃油加热器的二氧化碳排放约占电动客车运行过程中二氧化碳排 放总量的50%。若未来电网排放变得更加清洁,燃油加热器的排放占比还可能会更 高。这表明燃油加热器的排放不容忽视,未来在排放建模和车辆认证过程中,监管 机构或可考虑将燃油加热器纳入核算范围。

要想减少燃油加热器的排放,可考虑出台更加严格的测试与管理机制,这将 有助于维护电动客车的环境优势,减少实际排放,并支持交通系统向可持续方向转 型。同时,标准法规还需要进行定期更新修订,以确保其在技术不断发展的背景下 持续有效地推动减排。

参考文献

- Bræstrup, F. (2018). *Measurement of emissions from diesel fired heaters for buses*. FORCE Technology. 详见: <u>https://cleanbusplatform.eu/storage/files/measurement-of-</u> emissions-from-diesel-fired-heaters-for-buses-report-force-738844-1.pdf
- Chong, E. (2019, March 12). *Diesel air heater: The ultimate guide*. Vvkb Heaters. 详见: https://www.vvkb.com/diesel-air-heater/
- Humphries, K., Rashid, H., & Araji, F. (2024). *Diesel fuel-fired heater emissions from a battery electric transit bus in real-world conditions* (SAE Technical Paper 2024-01-5011). SAE International. 详见: https://doi.org/10.4271/2024-01-5011
- Mao, S., Niu, T., Basma, H., Yang, L., Wang, C., & Ren, J. (2023). *Greenhouse gas emissions reduction potential of CO2-based mobile air conditioning systems in China's electric bus fleets*. International Council on Clean Transportation. 详见: <u>https://</u> theicct.org/publication/ghg-reduction-of-co2-mvac-electric-buses-china-sept23/
- Mao, S., & Rodriguez, F. (2024). *Electrifying public transit: Zero-emission bus operations, charging, and maintenance in Chinese cities*. 详见: <u>https://theicct.org/publication/rw-use-cases-for-zero-emission-buses-operations-charging-and-maintenance-in-chinese-cities-oct24/</u>
- Mao, S., Zhang, Y., Rodríguez, F., Wang, S., & Hao, C. (2023). *Real-world performance* of battery electric heavy-duty vehicles in China: Energy consumption, range, and charging patterns. International Council on Clean Transportation. 详见: <u>https://theicct.org/publication/hdv-china-real-world-performance-apr23/</u>
- 生态环境部. (2025年1月21). 《关于发布2023年电力碳足迹因子数据的公告》 [Announcement on the 2023 electricity CO₂ emission factor]. 详见: <u>https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/</u>xxgk/xxgk01/202501/t20250123_1101226.html
- Pettinen, R., Anttila, J., Muona, T., Pihlatie, M., & Åman, R. (2023). Testing method for electric bus auxiliary heater emissions. *Energies*, *1*6(8), 3578. 详见: <u>https://doi.org/10.3390/en16083578</u>
- Sutton, K., Jokinen, K., & Silver, F. (2021). *Fuel-fired heaters: Emissions, fuel utilization, and regulations in battery electric transit buses*. CALSTART. 详见: <u>https://calstart.org/</u>wp-content/uploads/2022/01/FFH-White-Paper_Final.pdf

www.theicct.org.cn

communications@theicct.org

@theicct.org





