

重型柴油卡车达成2027年NO_x下降90%的技术可行性



2200 Wilson Blvd. * Suite 310 * Arlington, VA 22201

2020.2

目录

摘要.....	4
1 研究背景.....	6
2 发动机和动力总成 CO ₂ 和 NO _x 排放控制技术概述.....	8
2.1 停缸技术	8
2.2 先进的涡轮增压器 (Turbo) 技术.....	11
2.3 电动化	13
2.3.1 混动技术	14
2.3.2 高压系统.....	16
3 NO _x 排放标准达到 0.02 g/bhp-hr 的可行性论证.....	18
3.1 未来排放控制结构	18
3.2 排放模型参数设定	19
3.3 FTP 循环排放模型	19
3.4 低速和加载工况模型	21
3.5 排放测试结果	22
3.6 排放控制装置成本预估	24
4 燃料质量和催化剂耐久性因素	25
5.总结.....	27
参考资料.....	28

摘要

2014年，美国交通部门统计的NO_x排放量超过700万吨，这其中有50%的NO_x排放来源于重型道路车辆及非道路设备。NO_x是生成地面臭氧和二次PM_{2.5}的前驱物，因其对人体健康和环境造成的不利影响而受到国家环境空气质量标准（NAAQS）的管制。数百万美国人持续暴露于恶劣的空气质量中，因此美国环境保护署（EPA）和加利福尼亚州空气资源委员会（CARB）都宣布修订重型卡车排放标准的法规，其中特别关注要严格限制氮氧化物（NO_x）的排放。美国环保署的目标是在2027年前实施，而CARB则致力于在2024年和2027年间逐步采用更严格的标准，并希望其标准与美国环保署的国家标准保持一致。

本报告是对MECA在2019年6月10日发布报告的补充，其中我们对部件供应商（包括MECA成员）已经商业化的技术进行了评估，这些技术帮助其客户达到未来（2024-2026年）0.05g/bhp-hr的NO_x排放标准（MECA，2019）。在此报告中，我们介绍了安装在重型车辆发动机上的完全老化后处理设备的排放测试结果及其排放模型，以在技术上和经济上提供可以实现2027年度排放标准几种途径。通过对加速老化的催化剂进行测试，对其所使用的模型进行优化，并针对实际排放控制系统进行了验证。本报告中提及的基于市面上现有产品，可以在2027年之前应用在车辆上，以在重型FTP认证循环上达到0.02g/bhp-hr NO_x排放标准，在使用CARB提出的低负荷认证测试循环中达到约0.075g/bhp-hr NO_x排放标准。值得注意的是，有多种技术途径可实现这些低水平的NO_x排放，同时降低温室气体排放，有效地克服了常见的降低NO_x与CO₂排放相矛盾的问题。

以下报告是基于CARB工作人员在2019年9月26日公开研讨会上提出的实施时间表和监管规定。CARB工作人员提出了一项计划，在2027年使第二阶段NO_x排放法规规定与《中型和重型发动机和车辆的温室气体排放和燃料效率标准》第二阶段（以下简称“第二阶段GHG”）的第三实施阶段保持一致。计划包括，OEM厂商将必须在现有的冷启动和热启动工况下满足联邦测试程序（FTP）认证标准，并且满足低负荷循环（LLC）拟议的LLC-7（CARB，2019）和补充斜坡模式试验工况（RMC-SET）。作为将来标准的一部分，其中包括经过修订的重型车正在使用的测试（HDIUT）协议，该协议以低负荷的移动平均窗口方法代替了当前基于NTE协议。报告中考虑的技术，满足当前的全寿命设计（FUL），对于8类重型车辆，该寿命为435,000英里。应当指出的是，CARB目前正在考虑对MY 2027和以后的车辆使用更长的寿命周期和保修要求，但是此分析中使用的模型对于超过435,000英里的零件，尚缺少足够的实际数据来充分验证。

本研究报告行程如下结论:

1、发动机和后处理技术可以达成0.02g/bhp-hr的NO_x认证限值和低负荷循环 (LLC)下 0.075 g/bhp-hr的NO_x排放限值。

2024年至2027年逐步导入的满足未来NO_x限值的新型后处理装置架构是在2019年型DOC+DPF前方另加一套紧耦合双SCR催化器和双尿素喷射，如下图第二行所示结构。满足讨论中的2027 NO_x限值的路线是利用成熟的发动机技术、改进的热管理技术，以及基于高效催化剂和涂层技术的先进后处理系统设计，如下图第三行所示架构，是在2019年量产的系统基础上增加一套紧耦合SCR装置。

2、发动机效率和动力系统排放控制技术可以做到同时降低CO₂和NO_x排放

零部件供应商正在对以下整车和发动机效率提升技术商业化,包括发动机停缸技术、更先进涡轮增压器、电气化技术,并与先进排放就处理技术相结合。现在已经广泛证明使用目前商业化的先进技术克服了传统的CO₂和NO_x跷跷板关系,使两者都可以同时得到消减。

3、满足2027年卡车NO_x限值的排放控制系统成本,以第八级牵引车(Class 8 tractor)为例成本估计将增加约\$1,500~\$2,000美元。

MECA估计排放控制系统硬件成本,包括像加州大气资源局(CARB)资助的试验项目所展示的哪些发动机燃烧效率提升措施,以便满足FTP尾气排放认证规定的0.02 g/bhp-hr NO_x限值和未来LLC认证要求,对于一辆第八级牵引车来说上述改进措施估计将增加约1%的2027年型卡车成本。

1 研究背景

氮氧化物（NO_x）包含七种化合物，其中包含各种形式的氮和氧。由于该化合物对气候的负面影响，美国环境保护局（EPA）规定将二氧化氮（NO₂）和一氧化二氮（N₂O）统称为 NO_x。除了对健康造成不利影响外，NO_x 还参与大气化学反应，从而产生臭氧、酸雨和细颗粒物（PM_{2.5}）。由于 NO₂、臭氧和 PM_{2.5} 会对人体健康产生威胁，EPA 制定并定期更新了这些空气污染物的国家环境空气质量标准（NAAQS），以保护公众健康。目前，大约有 1 亿人居住在臭氧水平超过 2015 年国家环境空气标准的 70 ppb 的环境中，超过 3,800 万人生活在 PM_{2.5} 超过 12 μg / m³ 的地区（美国 EPA，2019 年）。减少臭氧和 PM_{2.5} 浓度的机制之一是减少致其产生的污染物，包括 NO_x 和挥发性有机化合物（VOC）。

2014 年，交通部门发布的 NO_x 排放量超过 700 万吨（美国 EPA，2017 年）。这比 1970 年的 NO_x 排放少 50% 以上，主要是由于车辆尾气排放标准越来越严格。柴油发动机是造成高 NO_x 排放的原因，如今生产的发动机和车辆必须满足严格的 NO_x 标准，即 0.2 g/bhp-hr。新型发动机和车辆通过采用选择性催化还原（SCR）与冷却的废气再循环（EGR）相结合来达到该标准。但是，当前的发动机在低负荷条件下保持低 NO_x 排放仍面临挑战，这主要是由于联邦标准计算方法允许去除在严苛运行条件（例如较低的车速、发动机低负载、后处理温度等）下的排放数据。在 2019 年 6 月发布的 MECA 白皮书中，我们介绍了 CARB 建议在 2024 年引入的新的低负荷认证循环（LLC-7）（MECA，2019）。LLC 测试的平均发动机工况运行水平约为 7-8%，低于重型车欧 VI-D 允许排除发动机功率低于 10% 标准。这个新的测试循环旨在解决功率低于当前 FTP 测试循环（平均功率 21%）的低转速和低负载运行时的超标排放问题，以确保后处理装置能够在这些严苛的运行条件下正常运行。

MECA 资助了国家可再生能源实验室（NREL）的一项研究，该研究从两个实际运行的工况数据库得到总结：一是 NREL 的 Fleet DNA 数据库，其中包括来自美国 25 种不同用途的 24 个车队 435 辆常规柴油动力卡车；二是加州大学河滨分校的 CE-CERT 数据库，该数据库由来自加利福尼亚州运营的 23 个车队的 10 种不同用途的 79 辆柴油动力汽车（Zhang, Miller, Kotz, Kelly 和 Thornton, 2019 年）。该研究提供了对在实际运行工况下减少 NO_x 排放的一些见解。这项工作的结果包括：

- 现实启动中冷启动工况占比约 12%，这适当地反映在 FTP 测试中复合加权 14.3%。
- FTP 认证循环中（1.5%）也可以很好地体现冷启动时间，而实际情况下冷启动时间为 1.3%。
- 目前的关于冷启动和热启动定义是基于冷却水温度，而冷却水温度往往与 SCR 入口温度及 SCR 性能无关。
- 许多实际的操作（30-70%）涉及热启动（基于冷却水温度），但后处理已经冷却到低于最佳工作温度，必须快速加热，以尽量减少 NO_x 排放。
- 在现实世界中，发动机的空转比排放模型较认证循环中所体现的空转更多。

如上所述，美国及世界各地的亿万人民仍呼吸着不健康的空气。美国许多人居住在臭氧不达标的地区，这些地区将从清洁重型发动机项目中受益。一项 MECA 资助的基于 EPA 的 MOVES 模型得出的结论是，假设从 2021 年开始实施采用 0.02g/bhp-hr 的国家 NO_x 排放标准，到 2030 年，美国加州及毗邻地区每天可减少约 350 吨 NO_x 排放 (TPD) (MECA, 2018 年)。如果将比 2010 年限值降低 90% 的国家标准完全导入重型车，将在 2050 年实现每天 730 吨的 NO_x 减排。虽然实施时间表已推迟到 2024 年和 2027 年，但如果将实施推迟三到六年作为一个因素考虑在内，该分析仍是对排放效益的合理预估。

MECA 估计，实现 8 类车 NO_x 减排，每吨 NO_x 的减排成本大约为 \$ 1,000 至 \$ 5,000。我们采用了一种成本效益方法，该方法基于 CARB (Hu, et al., 2019) 报告的认证排放水平(上限)和使用中的排放水平(下限)，遵循 2017 年 Carl Moyer 指导原则(CARB, 2017)，并假设重型发动机的功率、负载和年使用量为现有水平。

报告计算了 8 类车辆满足当前 435000 英里全部使用寿命的预估成本。由此产生的成本增加在一定范围内，这是由于假设试验循环 NO_x 排放减少量的与 CARB 报告中 Carl Moyer 方案实施的实际 NO_x 排放量之间存在差异。环保局估计，2010 年高速公路重型车辆每减少一吨 NO_x 排放需花费 2,000 美元 (40CFR 第 69、80 和 86 部分，2001 年)，这远远低于发电厂和工业 NO_x 排放的平均控制成本，据报道，降低发电厂和工业 NO_x 排放成本从每吨 2,000-21,000 美元不等 (美国环保局，2017 年)。根据 CARB 估计，2027 年的降低 NO_x 排放的成本约为每吨 6000 美元 (CARB, 2019 年)。关于技术成本的更详细的讨论见第 3.6 节。

本文讨论了在一些轻型汽车上使用的 NO_x 排放控制技术的进展，以及供应商为商用车提供的将 NO_x 降低到超低水平的技术。本文特别关注重型发动机在 FTP 和 RMC 认证循环上实现 0.02g/bhp-hr 排放标准的可行性，以及在不影响燃油经济性的同时，在 2027 年实现低负荷测试循环中 0.075g/bhp-hr 排放标准的可行性。

2 发动机和动力总成CO₂和NO_x排放控制技术概述

EPA2016年制定的《重型车第二阶段温室气体排放标准》(Heavy-Duty Phase2Greenhouse Gas Standards)中考虑了OEM厂商为满足2027年二氧化碳排放标准而可能采用的一些技术。能源部的Super Truck I计划展示了如何将这此技术结合起来,在发动机中实现50%的制动热效率利用,相当于燃料经济性提高16%,并通过采用这些技术进一步降低CO₂排放量。SuperTruck II计划的参与者正在论证更大的燃油和运输效率。在第一个SuperTruck方案最终确定和实施后的三年里,设备供应商不断创新,一些甚至在第二阶段规则中认为不合适的技术现在很可能在2024年和2027年广泛地应用在某些发动机上。其中一些技术正在SwRI进行的CARB低NO_x排放计划中测试,本节将对这些技术进行介绍。

2.1 停缸技术

停缸技术(CDA)是轻型车辆上已存在的技术,其主要目标是减少燃料消耗和二氧化碳排放。这项技术结合了硬件和软件,根据功率需求和发动机MAP图,保持有效气缸负载,“关闭”发动机的某些气缸,停止某些气缸在低负荷运行期间点火。通过减少发动机气缸运行数量,减少燃料消耗。

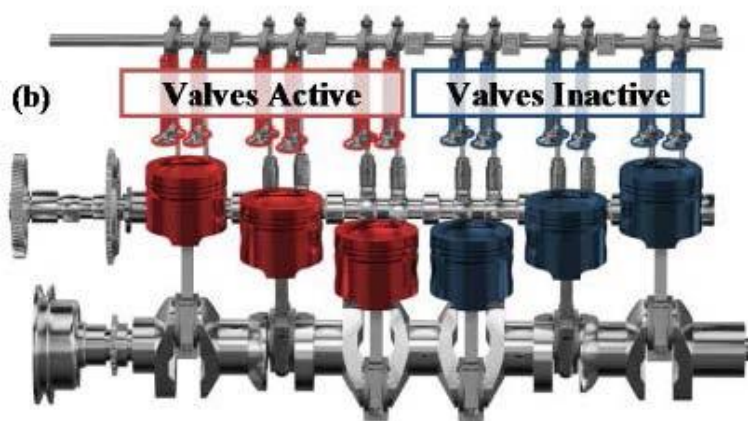


图 1. 停缸技术 (6缸发动机为例)

如图1所示,该技术利用气门挺杆上的电磁阀来在停用气缸时保持进气门和排气门关闭,而不是在滑行或空转时将冷气输送到排气系统中,阀门是关闭的,允许停用的气缸中的活塞上下移动,同时停止已停用气缸的燃料供给。关闭阀门消除了大多数泵气损失,这些损失降低了发动机的燃油效率和热效率。停用一部分气缸会使剩余的气缸在发动机运行中负荷增加,从而提高燃油经济性,产生更多的热量,使后处理设备更快地升温。此外,在减速和空转期间关闭发动机气缸会减少发动机和排气的流量,从而将热量保留在排气系统中。启用停缸技术的这两个优点均提高了SCR的效率,有效的减少了NO_x的排放。在低负荷运行期间,停缸技术可使排气温度升高50℃至100℃,该技术保持了SCR中NO_x的有效转化率。在一些演示中,停缸技术已与具有启停功能的48V轻度混合动力电动机结合使用,以扩大停缸技术在发动机上的适用范围,这可通过这些协同技术减少CO₂排放量。

气缸停用的频率可以在发动机标定的内置程序中设定，也可以添加一个微处理器来“动态”停用每个气缸。动态停缸技术是停缸技术的升级，它允许发动机中的所有气缸被停用，以平衡发动机运行中的动力需求。对于只能在发动机MAP图的某些区域被激活的双模式停缸技术，可将特定的气缸设计为开或关。在动态停缸技术中，控制器在每个点火冲程之前选择停用哪些气缸，以避免由于发动机发生共振导致的噪音和振动。动态停缸技术可以每分钟上千次改变点火气缸的组合，为停缸技术应用提供了更多机会。动态停缸技术已安装在多个型号的量产发动机上，同时减少了NO_x和CO₂的排放。

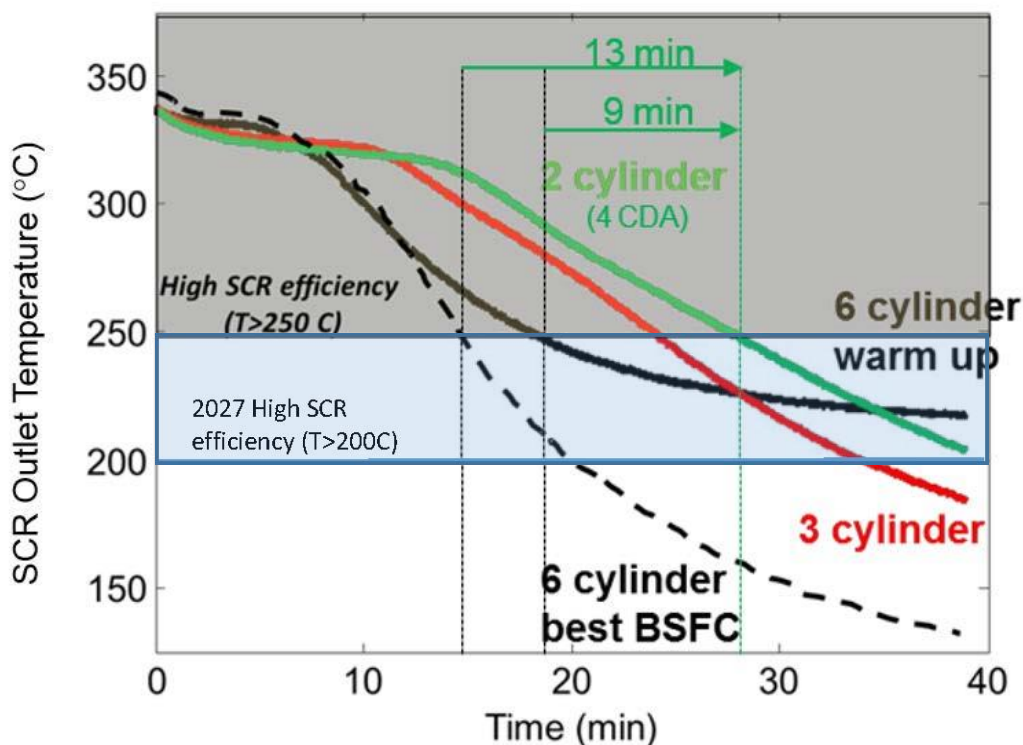


图2. 在发动机下降到怠速后，停缸技术有利于长时间保持SCR出口温度

几十年来，停缸技术一直是用在轻型汽车上的一种技术，现在它正在适用于重型柴油发动机。在柴油发动机上，停缸技术的调试与汽油发动机不同，目标是使柴油发动机在低负荷情况下运行得更激烈，让正在运行的活塞做更多的功。对于大量时间在低速和怠速运行模式下的车辆而言，这一点尤其重要。图2显示了在高负荷运行后发动机下降至怠速时采用停缸技术的好处（Allen等人，2019）。黑线虚线显示了发动机运行在在标定中最省油的工况下SCR出口温度下降的速度。黑实线显示了通过增加燃料喷射而增加热量。而通过停用三个气缸（红线）或四个气缸（绿线），排气温度可以保持较高的持续时间，而不燃烧额外的燃料。

在2019年6月发布的MECA 2024技术白皮书中，我们介绍了在使用停缸技术的中型发动机进行FTP循环的测功机测试结果，将停缸技术应用在发动机上，保持在低于3bar制动平均有效压力（BMEP）的热循环工况下运行900秒后进入冷循环。其燃油经济性提高3.4%（MECA，2019）。当发动机进行OC BUS测试循环，使用相同的热运行工况，大约可节省燃油5.6%。在整个循环中采用停缸技术在低于3 bar 制动平均有效压力的工况下进行测试，可节省8.7%的燃油，这表明其在实际运行中会表现更佳。同样，在drayage测试循环中，模式可以实现提高4%至35%的燃料效率（使用低于3barBMEP的停缸技术）。燃油经济性效益取决于发动机低负荷运行的时长，若发动机经常在低负荷运行，其效果更明显。（图3）

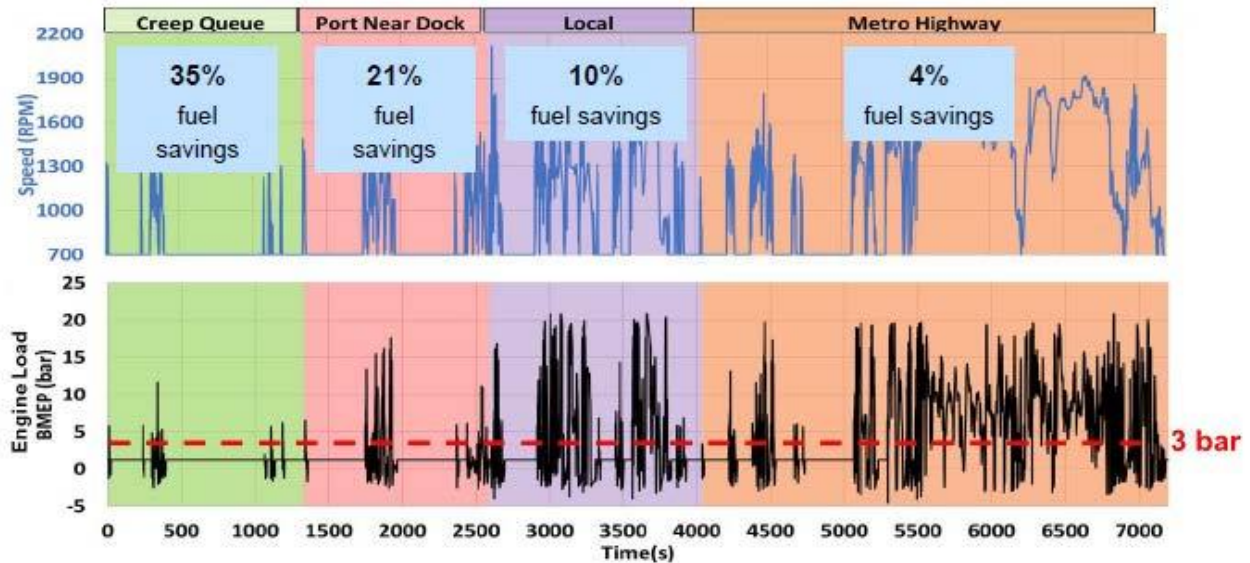


图 3. 在中型柴油机在港口拖船周期内运行时，将半发动机CDA运转在3 bar以下的燃油经济性。

最近对康明斯X15发动机和其生产的后处理产品进行了启用CDA和不启用CDA的测试。对发动机加后处理装置进行了几种测试循环，包括FTP、LLC、美国Beverage循环、纽约公共汽车循环和Orange County Bus 循环。结果汇总于表1。采用停缸技术得到较高的SCR温度，在降低了NOx排放的同时节省了燃料。

表1. 带有停缸技术的康明斯X15引擎与没有停缸技术的引擎对比的结果

测试循环	SCR 温度较原机升高	NOx 排放较原机减少	燃料消耗较原机节省
US Beverage Cycle	+ 24 °C	67%	5.0%
New York Bus Cycle	+ 14 °C	33%	7.8%
Orange County Bus Cycle	+ 17 °C	86%	3.2%

停缸技术还可以与重型柴油机的先进后处理技术相结合。由SwRI联合CARB进行的低NOx排放论证计划测试表明，CDA能够提高柴油机的排气温度，同时提高燃油效率。结合停缸技术和先进的后处理系统，包括具有一个SCR单元紧耦合在前的双SCR结构，能够在复合FTP测试循环（冷启动和热循环）中排放值达到0.018g/bhp-hr，在LLC循环中排放值达到0.12 g / bhp-hr（表2）（Neely, Sharp, Pieczko和McCarthy, 2020）。

表 2. CDA加先进后处理在康明斯X15发动机上的测试结果

	发动机NOx原排	加后处理后NOx	转换效率
Cold FTP	2.8 g/bhp-hr	0.040 g/bhp-hr	98.6%
Hot FTP	3.3 g/bhp-hr	0.014 g/bhp-hr	99.6%
Composite FTP		0.018 g/bhp-hr	
LLC	3.3 g/bhp-hr	0.120 g/bhp-hr	96.0%

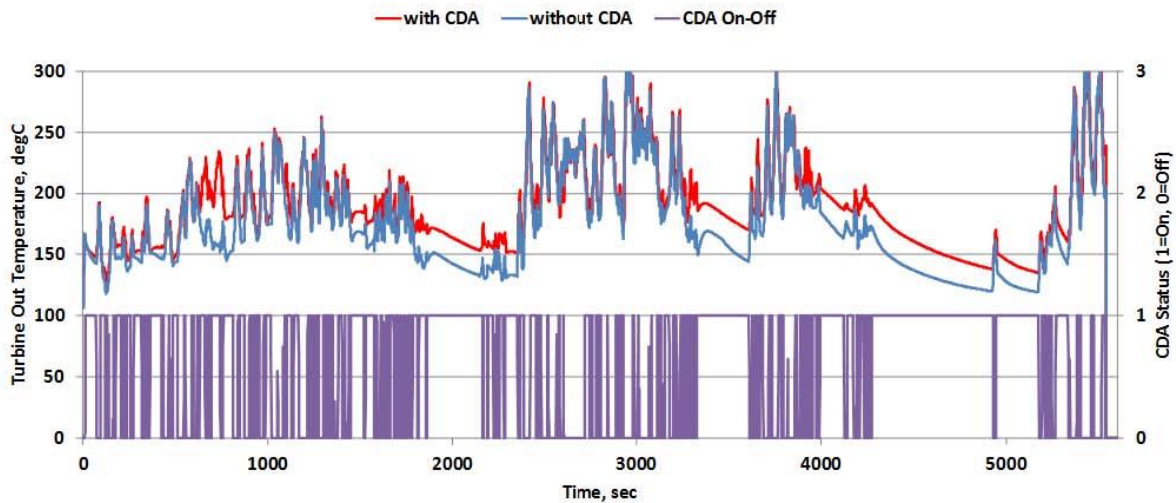


图 4. 在低负载循环中，气缸失活与排气温度升高的函数

图4是在SwRI进行的在测功机上得出的真实发动机测试数据的图表，这是CARB低NO_x排放论证计划的一部分（Sharp，2019年）。在低负荷循环中，停缸技术启用了60%的时间，主要是在驾驶或空转期间，并且使得排气温度显著升高。CDA作为一项技术，可在发动机空转或部分行车期间，将热量保留在排放控制装置中。

2.2 先进的涡轮增压器（Turbo）技术

涡轮增压器是重型发动机OEM用以提高燃油效率和减少排放的技术。涡轮增压器的应用可缩小发动机尺寸，在不牺牲峰值扭矩和功率情况下进一步降低油耗。涡轮增压器可以通过在高于大气压力的情况下向燃烧室充气来增加发动机的功率，从而使更多的燃料燃烧，进而使发动机提高动力输出。发动机排气以高于十万转/分的速度驱动旋转轴，这反过来又压缩了进入发动机进气歧管的空气。由于压缩空气的行为导致进气被加热，所以涡轮增压器通常安装有中冷器。最新的高效率涡轮增压器是DOESuperTruck计划（Navistar，2016）中已论证的高效工具之一。

除了提高发动机的功率外，涡轮增压器还在应对NO_x和CO₂排放法规方面发挥着重要作用。涡轮增压器技术的不断改进使运行快速高效的稀薄燃烧（高空燃比）成为可能。这使得发动机产生的颗粒物非常少，甚至减少了NO_x排放。此外，当进气歧管增压压力高于排气歧管背压时，这些高效涡轮增压器还可以影响泵送回路，提供曲轴正功，并改善制动比油耗(BSFC)和制动比二氧化碳(BSCO₂)。对于采用EGR的发动机，需要开发其他技术，包括使EGR泵小型化，以及机械或电气化的高压环路EGR泵。典型的EGR泵技术包括“硬化”的EGR罗茨鼓风机和离心压缩机。

现代涡轮增压器有多种可供选择的技术，可以通过提高热管理能力降低二氧化碳排放量，例如（1）先进的空气动力学（2）允许废气通过涡轮增压器以提高后处理温度的电动阀门（3）改善瞬态升压响应的轴承。这些技术可用于进一步减少二氧化碳及其他污染物的排放。更先进的涡轮增压器采用可变截面设计，可根据排气流量进行调整，对进气压力进行控制，优化空燃比，提高发动机性能（例如，在较低的转速下提高扭矩）和燃油经济性。这些变截面涡轮增压器（VGT），也称为可变喷嘴涡轮增压器（VNT）和可变几何形状涡轮增压器（VTG），同样是通过提高热管理能力来增强后处理起燃，从而降低CO₂排放。最后，现代涡轮增压器使发动机和汽车

制造商能够缩小发动机的尺寸，从而在不牺牲动力或性能的情况下节省燃料。

复合涡轮技术是涡轮增压器技术的一种升级，它从废气中提取机械能，并通过变速器施加到发动机曲轴上。一些柴油发动机采用了机械复合涡轮，EPA估计，到2027年全面实施第二阶段温室气体管制时，美国的复合涡轮技术使用率将达到10%（美国环保局，2016年）。在CARB HD低NO_x排放测试计划中，美国西南研究所测试了第一阶段使用2013年初版本涡轮复合材料的发动机，并在几篇SAE技术论文中总结了该发动机的后处理测试结果（Sharp, Webb, Yoon, Carter, & Henry, 2017; Sharp, 等人, 2017-01-0954; Sharp, 等人, 2017-01-0958, 2017）。虽然复合涡轮具有降低燃料消耗的潜力，但它会导致较低的排气温度，从而影响后处理性能。因此，重点考虑的是在冷启动和低负荷运行期间结合旁通系统的对复合涡轮进行的设计，或者在后处理系统之后可以适用的电动复合涡轮系统。

供应商们考虑到未来的低NO_x要求以及第二阶段温室气体限制标准，已经开发了新的涡轮，并正在与一些原始设备制造商进行商品化开发。驱动涡轮增压器是另一种可专门用于减排战略的技术。驱动涡轮可以独立于发动机的排气流量外控制涡轮机械的转速，并改变发动机转速和涡轮转速之间的转速比。这是通过利用机械或电气部件，加上减速传动（机械驱动）或电机发电机（电驱动），来增加或减少涡轮增压器轴功率来实现的。

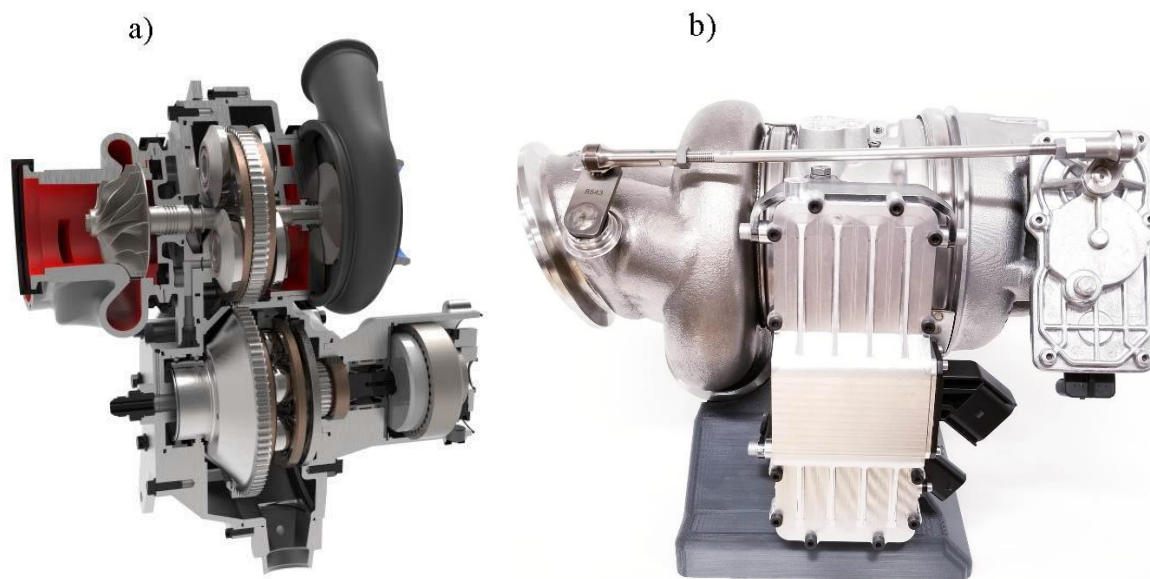


图 5. a) 机械驱动涡轮增压器, b) 电动驱动涡轮增压器

驱动涡轮增压器的应用考虑性能、效率和排放等几个因素。被认为是“按需”供给空气装置的驱动涡轮，也通过被动涡轮接收瞬时能量。在瞬态运行过程中，驱动涡轮将消耗机械或电能来加速涡轮机，以改善发动机的响应。由于它们不需要直接平衡涡轮机和压缩机的功率，因此与传统（仅废气驱动）涡轮增压器相比，从动涡轮增压器可以利用不同的涡轮机和压缩机来设计。与传统涡轮在较低功率的发动机工况下可提供的功率相比，驱动涡轮可提供更多的压缩机功率。在高转速运行时，从动涡轮将以复合涡轮的形式将机械能或电能提供给发动机，这可以回收多余的排气动力以提高效率。这种累积效应使驱动涡轮可以执行增压器、涡轮增压器和复合涡轮的所有功能。

氮氧化物排放控制在从驱动涡轮增压器的应用中获得了几方面的好处。采用驱动涡轮可以使发动机与增压压

力解耦，减少瞬态工况下发动机NO_x排放，提高冷启动和低负荷运行时的后处理温度。当SCR温度下降到NO_x转化的最佳温度以下时，结合旁通阀可以将所有排气流完全引导绕过涡轮增压器，并直接引导至后处理装置中，从而使后处理温度快速升高。被绕开的驱动涡轮增压器仍可以通过增压向发动机提供必要的增压压力，这也增加了发动机的总负荷，从而有助于提高排气温度。测试表明，通过绕过涡轮增压器将发动机废气引导至后处理是加热后处理的最有效方法之一。

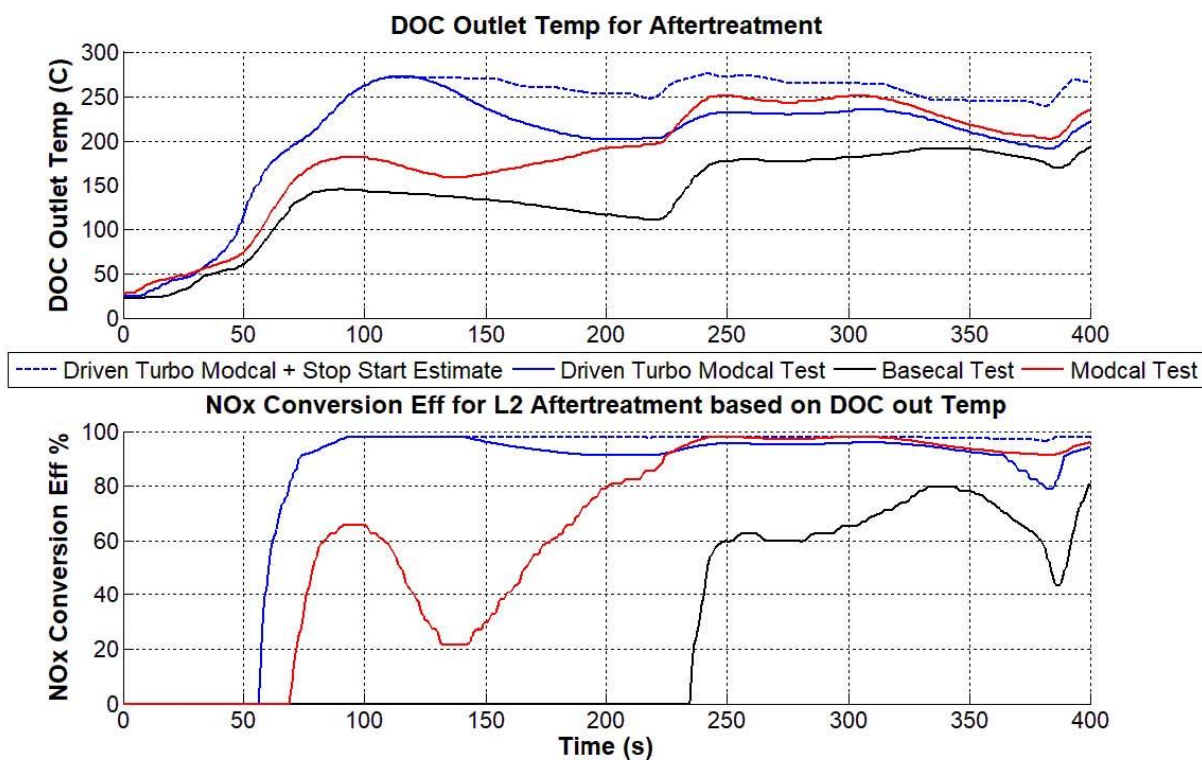


图6. FTP 发动机冷启动温度和NO_x转化效率

测试结果表明，在FTP冷循环的前400秒钟内，机械驱动的旁通涡轮可以使尾气NO_x的排放较基准配置降低50%。此外，在怠速期间结合起停技术（在下面的第2.3节中有更详细的描述）还可以使后处理保持热状态并减少CO₂排放，同时为后处理恢复负载过渡做好准备，并实现增压的快速响应。NO_x转换效率的提高归因于此技术结合后进行修改标定（Modcal），从而实现温度的快速升高（图6与基本发动机标定的对比）。温度的快速上升还使发动机很快可以返回到其更有效的运行工况。尽管增压模式会消耗功率，但排气温度快速升高，启停技术、复合涡轮技术和标定的综合效果可以带来总体的CO₂排放降低，同时在运行前期提供最佳的NO_x转化率。从动涡轮增压器已反复证明，稳态循环工况下二氧化碳排放降低了4%以上，行驶工况下降低了6%以上。

2.3 电动化

电气化的动力系统正在迅速地从轻型客车应用到商用卡车和公共汽车上。电动化的技术水平和市场占有率随重量级别和用途的不同而不同，但监管机构和汽车制造商已经认可动力总成电气化是减少二氧化碳和污

染物排放的有效手段。几乎所有设备制造商都出售并展示了众多电动轻型车和电动商用车。据预计，到2027年，电动化将在帮助OEM满足未来的NO_x和GHG标准方面发挥更大的作用。作为CARB Omnibus和EPA Cleaner Trucks倡议法规的一部分，CARB和美国EPA都已表示考虑利用动力总成电动化实现超低NO_x尾气排放。

在本节中，我们介绍了几种电动技术，这些技术将在2027年之前在市场上销售，以使原始设备制造商可以利用电动化实现同时减少NO_x和CO₂的排放。

2.3.1 混动技术

正如我们之前的白皮书（MECA，2019）中简要讨论的那样，预计48伏混合动力系统及其组件将在不久后应用于重型车辆。这些48伏混动系统可以在奔驰、奥迪和PSA的许多轻型车型（主要在欧盟）上找到。在美国，FCA在RAM 1500皮卡和eTorque名下的Jeep Wrangler上提供48V系统。因为技术人员对电气系统进行维护时安全电压的阈值为60伏，所以从安全实施的角度来看，48伏系统是安全的。从成本角度看，48伏系统包括更低的起动机和其他线材要求，并相对于全混合动力的高压架构更节约成本。美国能源部的SuperTruck II计划团队正在尝试采用48伏技术，以演示制动热效率高于55%的卡车（美国能源部，2018年）。图7提供了一个48伏系统的示意图。

与乘用车类似，卡车的OEM厂商也在考虑将传统的机械驱动组件替换为电动版本，以提高效率。由于消耗更多功率（例如泵和风扇）在较高电压下工作时的效率更高，减少了电损耗，因此使用48伏比使用12伏的组件运行效率更高。可以电气化的组件包括电动涡轮、电子EGR泵、空调压缩机、电加热的催化剂、电冷却风扇、油泵和冷却剂泵等。48伏系统可以实现的另一项技术是电力启动，而不是使用发动机驱动的辅助启动单元，或空转主机。将发动机与附件解耦和可以减少外设阻力，同时允许根据客户和车辆的要求对发动机外设设置占空比。此外，卡车上采用48伏电源架构仍可为驾驶员熟悉的12伏配件供电。为商用车辆提供商用48V组件的MECA成员认为，到2024年，该技术将用于有限数量的发动机系列，并且到2027年可能会看到更大的普及率，尤其是在全混合动力不太实用的长途运输的8类车上。

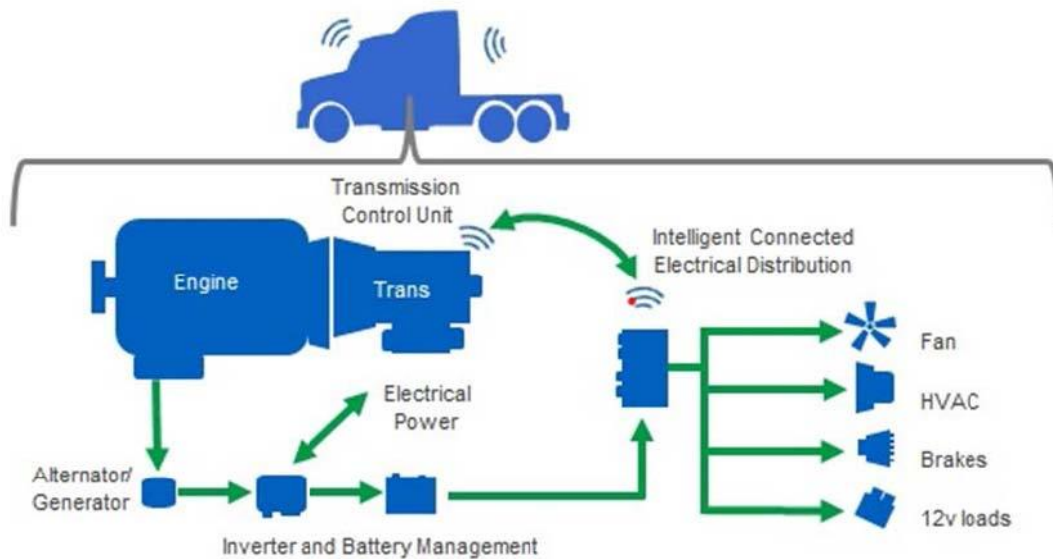


图7. 48伏商用车的示意图

尽管使用48伏混合动力车具有燃油经济性优点,但卡车上对更高电压系统的需求也受到其他需要的推动,例如使发动机或车辆部件电气化可以减少发动机的负载,并提供一种可以将制动能量捕获并存储在电池中,以备将来发动机不工作时使用的工作机制,以减少动力系统的整体二氧化碳排放,提高卡车的燃油经济性。另外,驾驶员安全功能和其他娱乐配件正在增加车辆的电气需求,这超过当前的12伏电气系统的能力。更高电压的电气系统(例如48伏)可能会成为满足更多车载电源需求的首选解决方案。

轻度混合动力涵盖了一系列组件,但最有用的组件包括电动机和发电机、制动回收、电动助力和先进的电池。对启停功能的设置还可以减少热怠速工况下通过后处理的冷却气流,从而为后处理提供热管理优势。这样来看,48伏轻混技术是停缸技术和启停功能的补充技术,在一辆车上结合多种技术,产生协同效益,并最终验证成本增加在合理范围。

轻度混动技术设计将电动机和48伏电池、发动机以及普通卡车上的12伏普通电池结合在了一起。48伏轻混包括一个传统的12伏网络,就像大多数传统车辆使用的电池一样使用铅酸蓄电池,但它增加了一个48伏锂离子电池,有一个单独的48伏网络。12伏网络可处理传统负载,例如照明、点火、娱乐和音频系统;48伏系统支持主动底盘系统和制动回收,并可以进一步电气化其他部件。利用高电压设计,全混合电气系统会利用48V架构来运行辅助设备,此外还通常利用高压电路驱动电子轮轴。

已开发出先进的启停系统,利用使用皮带驱动感应电动机在48伏系统中充当起动发电机(BSG)。发动机运转时,感应电动机将充当发电机为单独的电池充电。当需要启动发动机时,感应电动机随后通过辅助皮带施加其扭矩并驱动发动机,而不是利用启动机启动。单独的电池也可以通过制动动能回收系统进行充电。除了起停功能外,BSG系统还可以通过高速巡航或减速时切断燃油供应来提高燃油经济性。这样的系统还可以设计向传动系统提供短暂的功率提升,通常可提升10至20 kW。提升能力受48V电池容量和将电动机连接至曲轴的部件性能的限制。新设计将BSG直接连接到曲轴,并允许提供高达30kW的额外功率提升,从而为轻型和中型商用车带来更多利好。

电动增压器和涡轮增压器是48伏结构下所支持的两种技术。对于前者，在启动或重新启动时以及在发动机转速较低时，可使用电力驱动涡轮，以减少或消除涡轮迟滞现象。这有利于低速扭矩、加速性能和燃油经济性的提升。电动涡轮增压器（在上文第2.2节中进行了描述）可独立运行于废气涡轮之外。

电加热催化剂（EHC）于1990年代后期开始出现，当时需要更好的冷启动排放控制以满足加州的LEV2标准。当时车辆上仅提供12V电气系统，这难以满足加热EHC的功率需求，并且随着OEM厂商的技术积累，利用催化剂紧密耦合，能够在不加热催化剂的情况下满足加利福尼亚和美国EPA的排放标准，以此成为最受欢迎的解决方案。最近，随着48V电气系统在欧洲市场被重新使用，EHC也被重新考虑，实际上EHC已被应用于某些乘用车的热管理。最近研究热点转向利用低温燃烧以实现更高的燃油经济性，引起了人们对将EHC进一步应用于轻型车辆领域的一些讨论。正如MECA的最新白皮书中所讨论的那样，可以通过将尿素溶液喷洒到电热催化剂（EHC）上来实现尿素的供给（MECA，2019年）。以4 kWh的功率为EHC通电，在180°C的温度下供给尿素，而SCR正常的反应温度为200°C，与普通的紧耦合后处理装置相比，FTP测试循环下NO_x排放量减少了40%。商用车采用48伏电气系统可以实现更高效的EHC以用于热管理以及定量加热，因为电气系统比发动机可以更有效地制造热能。此外，利用电池中收集和存储制动回收能量用以加热EHC，利用EHC的主动加热可实现二氧化碳的零排放。

在48伏架构中考虑用于电气化的另一个柴油发动机关键组件是废气再循环（EGR）泵。电动EGR泵可与发动机转速分离，独立控制的EGR率。这在低速运行中很重要，以前在低速运行中很难提供足够的EGR率来减少发动机NO_x排放。与普通涡轮增压器相比，电动EGR泵还可以独立调节EGR率来优化涡轮增压器。例如，对一个由高效固定截面废气涡轮增压器和电动EGR泵组成的系统进行优化，以最大程度地优化涡轮增压器工作，以此提高燃油经济性。

2.3.2 高压系统

在使用合适的线材情况下，最新的系统48 V轻混系统可提供最大30kW的总功率。在欧洲，混合动力或纯电动传动系统的轻型汽车变得越来越普遍。目前，在美国也可以找到使用混合动力配置的几种轻型乘用车和轻型卡车。其中包括一些可以实现一些纯电驱动的车辆，通常称为纯电力驱动（AER）。完全混合动力可以使轻度混合动力汽车的上述更多部件电气化，并且较高的电压可以使许多部件达到很大程度的电气化。全混合动力系统采用更大的电动机和电池，可支持更大的加速能力和制动回收功率。

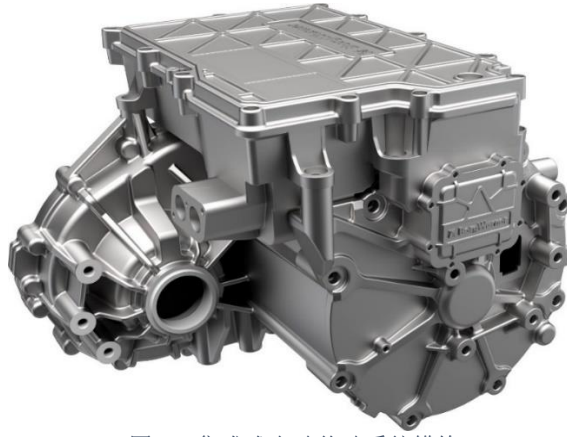


图 8.1 集成式电动传动系统模块

轻度混合动力非常适合用于长途运输的重型车辆，而全混合动力在高速公路上的燃油经济性较差。完全混合动力和电气化对于小型长途车辆（例如4-6级）而言是比较实用的，这些小型车辆不必长距离行驶或长期行驶而不返回。全混合动力汽车在包裹运送、饮料运送和食品配送车辆中的市场占有率最高（CARB, 2015）。我们期望在一些用途中看到将全混合动力车与低NO_x发动机结合使用，以减少CO₂排放。

集成的电动传动系统（图8）由完整的变速箱、电机和电子控制器组成，现已上市。这些传动系统功率水平超过160kW，并且能够满足高扭矩要求，可应用于中型商用车。而越来越多的电动传动系统解决方案的功率达到了300kW，可与电池或燃料电池一起应用于8类车辆。

3 NO_x排放标准达到0.02 g/bhp-hr的可行性论证

仿真模型是技术开发人员在设计发动机部件以及催化剂排气系统期间的宝贵工具，可以通过优化设计，从而无需搭建发动机或反应测试的全尺寸或者小型化的实物。为了有效仿真模拟，必须根据实际部件测试或发动机零件老化情况验证气体流动、排气流动和催化剂反应机理，以确保实际与模型假设相符。当催化剂制造商为特定发动机设计后处理系统时，他们会将排气温度、流速和发动机排气化学成分输入模型中，以确定满足排放限值的特定尺寸、结构和催化剂化学成分。这些模型还可以直观的反映催化剂体积和负载量对测试循环内污染物排放量的影响。

MECA成员为美国西南研究所的测试计划设计了排气后处理装置，利用了专有模型来确定合适的催化剂技术，实现FTP测试达到0.02g/bhp-hr的排放目标。本节中讨论的结果基于将这些模型应用于加装了停缸技术的2017年康明斯X15发动机的排气测试。美国西南研究所提供了发动机的排气特性，例如流量、温度和NO_x排放水平等，将其输入模型。最后，在美国西南研究所进行的（CARB, 2019）、FTP和低负荷循环（LLC-7）测试中都证明了催化剂电辅热和定量供给尿素的优点。

3.1 未来排放控制结构

与我们之前关于2024年发动机标准的白皮书（MECA, 2019年）中的类似，MECA进行了一项研究，将SWRI开发的改进后的发动机的排气特性输入排放模型，模拟完全老化后的排气后处理系统的排放。对之前的MY 2024 MECA白皮书中的两个系统和几种方案，包括冷启动和热启动FTP的排放以及低负荷循环都进行了建模。如前所述，我们认为，即使是传统的后处理架构（如以下S1），也可以通过结合改进发动机标定，采用更好的催化剂和更好的尿素喷射，满足2024年达到FTP测试循环0.05g/bhp-hr的排放限值。到2027年，OEM厂商将完成催化剂电加热和双SCR系统的技术突破，并开始将发动机和动力总成纳入热管理和CO₂排放控制，以满足未来的尾气NO_x排放标准以及第二阶段的温室气体排放限制。在本节中，我们讨论了一些技术改进，例如停缸技术的使用，双尿素喷射的紧耦合SCR结构和一些正在OEM实验室中进行的试验（Cummins, Inc., 2018）。

模型中采用的系统布局形式如图9所示，包括由DOC，DPF和SCR（S1）组成的传统系统布局，以及两个高级系统布局（S2和S3）。S2和S3中，多出的SCR有助于发动机废气温度利用。这些系统结构体系演示了OEM在设计MY 2027型发动机的排气控制时可使用的几种选项。S1布局形式与当前排放控制系统类似，但使用的是当今提供的最新一代SCR催化剂。系统S2是双SCR装置，前、后SCR装置都位于排气管上。这种较小的SCR系统通常具有加热的尿素喷射器。SCR催化剂和氨气漏失催化剂（ASC）布置在DOC前端，催化型DPF上游和下游的SCR / ASC（使用常规尿素喷射器）。此配置可能比S1稍大，但仍比原始MY 2010型发动机排放控制系统小得多。最后，系统S3保留了双SCR装置，但将前部SCR置于涡轮增压器出口处的闭合位置。与S2不同，S3中的前SCR和尿素喷嘴很可能会安装在发动机内部，以充分利用排气温度。

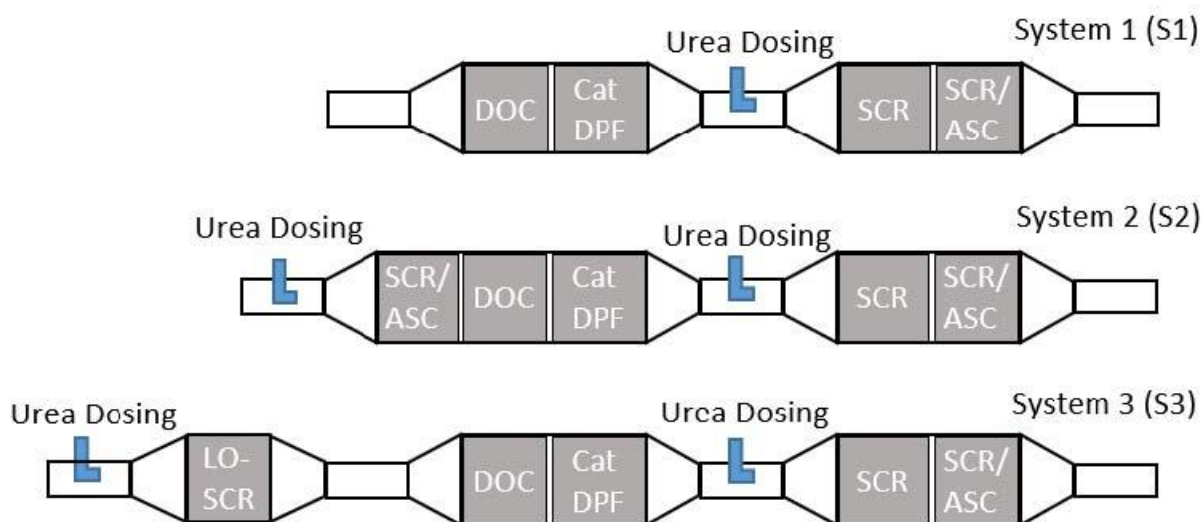


图9以证明2027年发动机排放可行性的测试系统配置形式。系统S1基于当今生产的2019年发动机。系统S2在双SCR装置中采用起燃SCR。系统S3采用双SCR装置，该双SCR装置在包含DOC，DPF和后端SCR的传统地排气控制系统的上游配备了涡轮增压闭式SCR。

3.2 排放模型参数设定

在图9所示的三种后处理设计布局形式中，使用改进的发动机标定和先进的后处理装置（包括DOC，SCR和ASC）进行了排放模型分析。模型输入包括来自发动机的实际发动机排气数据。SwRI在实施CARB“低NO_x排放控制示范”项目中使用先进的冷启动策略对CDA进行了标定。CDA基于热管理功能可在冷启动过程中快速对排气进行加热以降低发动机的NO_x排放。输入到模型中的催化剂转化参数是从市场上现有的催化剂中得出的，完成435,000英里运行寿命期间催化剂的这些参数符合使用要求。

模型采用的催化器尺寸是现代商用车上的平均SCR体积。值得注意的是，不同的发动机厂商会根据发动机排出的NO_x浓度，发动机标定以及发动机使用寿命内预期的劣化程度来设计SCR体积。除了气缸热管理之外，该模型中没有其他主动热加热装置，例如没有在DOC上游喷射额外的燃料，仅利用SwRI提供的发动机排气温度数据。最后，该模型设定了针对S1形式的单尿素喷射策略以及针对S2和S3形式的双尿素喷射策略（图9）。S1的尿素喷射策略取决于废气温度，从150℃的最小定量和185℃的完全定量开始。模型将低于185℃排气温度下所喷射的尿素加热，以防止尿素沉积在载体、混合器或排气系统上。S2和S3的尿素喷射策略包括在130-150℃之间开始的前SCR的加热定量喷射和后SCR的常规定量喷射。前尿素喷嘴和SCR仅在排气温度较低时才启用，后SCR用于发动机正常运行状态下的排放控制。

3.3 FTP 循环排放模型

图10显示了图9中三种排放控制系统的预测排放情况。结果表明，先进的排放控制系统在FTP循环中NO_x加权复合排放量可实现小于0.02g/bhp-hr。实际上，这些模型预测，如果现有排放控制系统（S1）尿素喷射策略更完美，发动机标定更准确，结合市场上最优的催化剂，它们的复合FTP NO_x排放速率也将达到0.02g/bhp-hr。

尽管这不足以强制OEM厂商依靠必要的合规性裕度来确保卡车在一百万英里使用寿命内的排放合规性，但它显示出未开发的排放控制性能提升无需对当前系统设计进行重大更改。此外，重型柴油发动机的排放模型与天然气发动机相似。

与LLC相比，在FTP测试循环下，三种系统布局形式的性能差异并不明显（请参见第3.4节）。有两个原因：首先，如在FTP测试中待系统预热后，所有排放控制系统中的催化剂都非常高效，复合FTP测试结果中的热FTP排放权重为6/7，其中冷FTP排放权重为1/7；其次，减少冷启动排放主要是通过通过在发动机上主动地或通过排气绝热的热管理策略被动地来实现的，所有布局形式都可以从这些改进中提高催化剂性能。由于催化剂配方和建模假设的变化，在对不同系统进行建模时，结果可能会发生变化。在图10中，S2和S3之间的差异很小，最有可能由模型可变性来解释。此处报告的最低模拟结果(0.014-0.016)在FTP NO_x排放标准为0.02g/bhp-hr的情况下，约有25%的裕度。应当指出的是，此处显示的模拟结果与2019年9月26日CARB研讨会上提出的低NO_x测试计划第3阶段中发动机初步测试结果相吻合，见图12（Sharp， SwRI的低NO_x示范项目，2019年）。

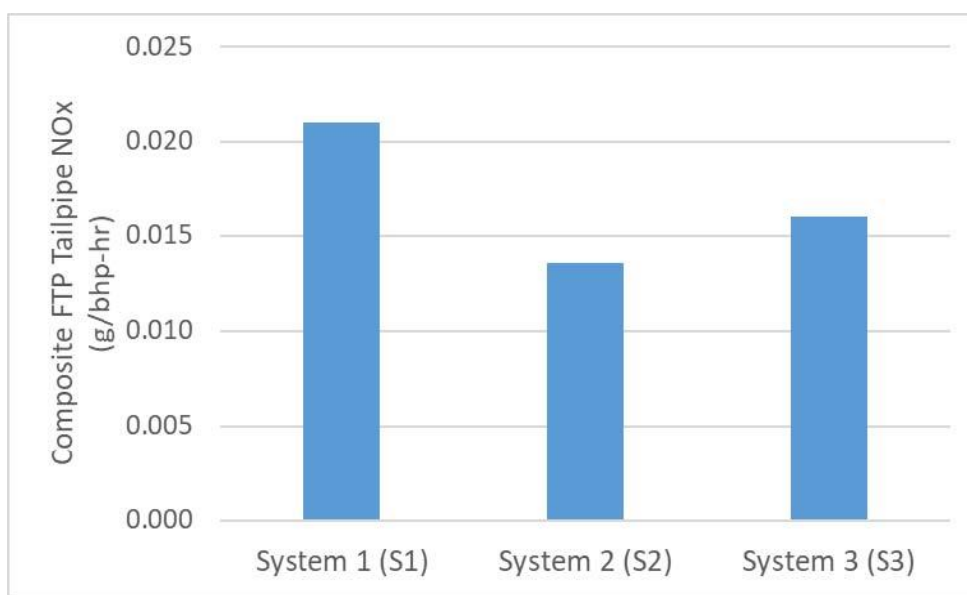


图10 三种不同布局形式中采用的最新一代催化剂的复合FTP NO_x排放结果

正如我们在MY 2024技术的白皮书中指出的那样，可以优化排放控制装置以最大程度地减少N₂O排放。后处理厂家可以利用多种方法来优化排放控制系统以降低N₂O排放，包括催化剂配方、系统结构设计、发动机与后处理标定以及精确的尿素喷射控制。台架测试结果显示了后处理装置能够在还原NO_x的同时将N₂O排放量保持在0.1gN₂O/bhp-hr以下（MECA，2019）。此外，在CARB低NO_x示范计划中进行的测试表明，使用双SCR系统时，N₂O含量也远低于联邦限值，该系统也达到了该项目的NO_x和CO₂目标，如下图12所示（Sharp, SwRI低排放NO_x示范计划，2019年）。双SCR系统的优点是能够通过标定和控制同时还原NO_x和N₂O。这是因为排气经过DOC后，在DOC中形成了NO₂，下游的SCR系统在转化NO_x的量降低，但这会以增加N₂O形成成为代价。在NO_x到达DOC之前，部分还原NO_x的双SCR系统将在下游SCR上产生更少的N₂O，从而实现高NO_x转化率同时降低N₂O排放量。对N₂O排放控制很重要，因为按照第二阶段GHG法规，当车辆排放超过上限时，可以以N₂O的GWP乘以298的倍数与CO₂进行抵消。

3.4 低速和加载工况模型

随着CARB和EPA规划未来的重型发动机低NO_x排放标准，两个机构都意识到必须开发新的认证工况，以更好地代表车辆实际运行过程中的复杂工况。国际清洁运输委员会（ICCT）最近进行的研究分析了欧美在用柴油卡车测试数据。结果表明，采用类似的排气系统配置，美国卡车的NO_x排放量比欧洲卡车高出约50%。（Badshah, Posada和Muncrief，2019年）。当然，美国生产的发动机必须遵守（NTE）符合性测试，而欧洲发动机则经过不同的标定以符合移动平均值窗口排放限值以及城市低速工况。重要的是，直到最近，欧洲卡车还没有遵守CO₂标准，而且欧洲没有N₂O排放标准。在卡车上实施诸如SCR之类的排放控制之前，美国已经确立了NTE要求，并且NTE旨在控制高速下的NO_x排放。由于未考虑到SCR低温NO_x转化的局限性，因此

美国未通过发动机标定来解决低负荷运行中的NO_x排放问题。综上所述，通过改进标定，到2024年，当前的发动机和最新的排放控制技术在FTP认证周期内能够实现低至0.05g/bhp-hr的NO_x排放，从而具有足够的合规余量。但是，在低负荷运行中，SCR处于催化剂起燃温度以下时，现有的发动机可能需要修改标定和并进行更好的热管理。

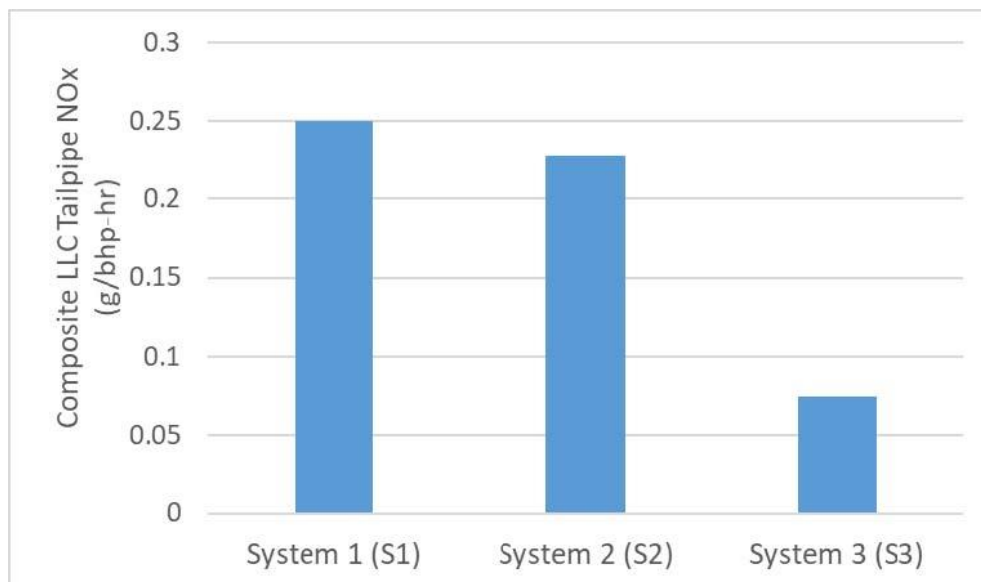


图11. LLC测试条件下在三种不同布局形式NO_x排放模型。

MECA通过SwRI开发并由CARB提出的LLC-7循环，对图9中所示的三种排放控制系统布局下的发动机NO_x排放进行了建模（CARB，2019），并对具有行业平均SCR系统体积的催化剂进行了建模。SwRI根据CDA进行发动机标定，提供了该测试循环的发动机排放水平和排气温度，以提供热管理，而无需在DOC上游增加辅热装置（这会增加CO₂排放）。与上面的FTP模型一样，LLC模型评估了当排气温度达到130-150℃时，每个双SCR系统中前SCR的加热程度。如我们在2024 NO_x排放控制技术白皮书中所述，辅热装置可在较低的温度下将尿素转化为氨气，因此SCR可以在比如今卡车上常用的典型200℃起燃温度更低的条件下发生NO_x转化（MECA，2019）。当在较低的温度下使用传统的尿素喷射时，加热的尿素还可以降低结晶的风险（MECA，2019）。鉴于最近对LLC发展的讨论，该模型假定运行之前，需要一个热FTP的预处理周期。估计这将导致SCR催化剂上约20%的氨预存储。结果如图11所示，表明S3紧密耦合SCR架构可在LLC循环中实现NO_x排放低至0.075g/ bhp-hr。S3中的密闭SCR利用较高的排气温度，可实现低负荷和低速运行期间NO_x的显著降低。

3.5 排放测试结果

如前所述，自2015年以来，SwRI一直在进行一项测试计划，以证明在当前重型柴油发动机上满足低NO_x排放水平的可能性（Sharp, Webb, Yoon, Carter和Henry，2017年）。该测试计划的三个阶段已设计完成，其中两个阶段已在MY2013 Euro VI发动机上完成。第3阶段测试使用的是MY2017非涡轮耦合15L发动机，以及未来的排气系统配置，例如图9中的S3。其他发动机技术（例如CDA和EGR旁通）用于实现最低的NO_x排放，同时不增加油耗。此阶段测试的初步结果与上述第3.3节和第3.4节中介绍的建模结果相吻合。这是理所当

然的，因为与此处介绍的模型一样，这些模型在催化剂的体积、催化剂的化学性质、结构和尿素喷射策略等方面做出最优的匹配。如先前用模型化的排放结果，发动机测试结果证实了先进柴油发动机和后处理能够达到与天然气发动机同等的NO_x超低水平排放。

图12为在实验室中发动机台架的排气系统测试结果，为截至本报告发布时CARB低NO_x示范计划第3阶段。基于发动机的全面加速老化正在进行中，并将在不久的将来发布。如图12a所示，实验室发动机台架测试中，在排气管处FTP复合排放结果（0.019g/bhp-hr）与S3模拟NO_x排放（0.016g/bhp-hr）相当。到2027年，OEM厂商将能够利用其专业的标定在FTP周期内提供低于0.02g/bhp-hr的额外裕度。将发动机测试与S3的建模结果进行比较是最合适的，因为两者都包括与SCR催化剂耦合，是与第3阶段发动机测试中使用的后处理系统最可比的配置。同样，发动机测试的LLC排放结果（0.064g/bhp-hr）比S3的模拟NO_x排放结果（0.075g/bhp-hr）约低15%，这主要是由于SwRI的进一步改进标定在整个周期内优化排放。尽管未在图中显示，但应注意SwRI还描述了第三阶段系统的N₂O结果：对于复合FTP，RMC和LLC循环，这些参数已很好地控制在0.065g/bhp-hr，0.05g/bhp-hr和0.05g/bhp-hr。重型车第2阶段法规要求的N₂O限值为0.1g/bhp-hr。

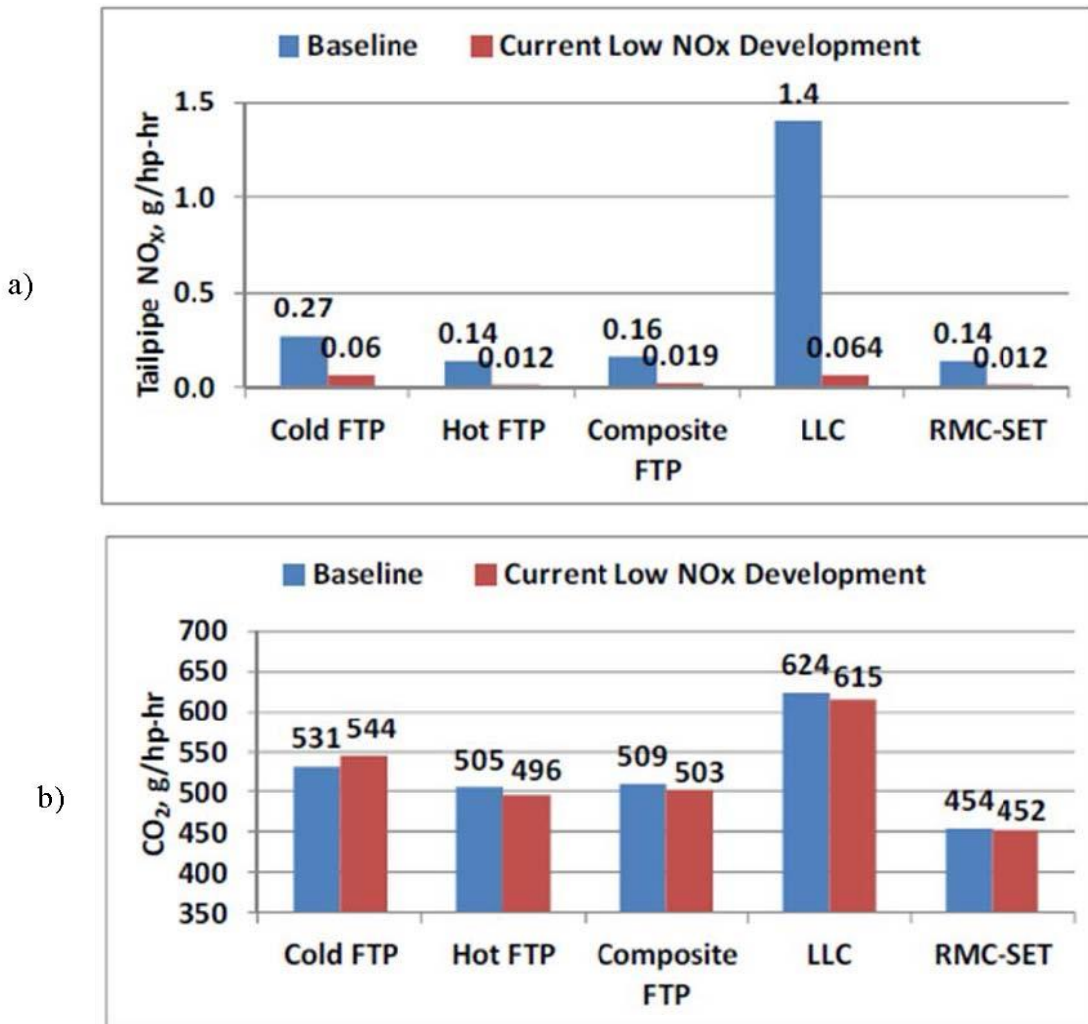


图12. SwRI的重型低NO_x示范计划中的排放结果 a) NO_x; b) CO₂ (Sharp, Update on Heavy-Duty Low NO_x Demonstration Programs at SwRI, 2019).

这些发动机测试结果显示了后处理模型在预测排放中的重要性，同时也证明了发动机标定对发动机和后处理系统进行微调以超出模型预测的重要性。图12b表明，不仅可以将FTP上的NO_x限值降低到0.02g/bhp-hr以下，而LLC上的NO_x限制降低到0.064g/bhp-hr以下，而且在不增加油耗的情况下就可以实现。实际上，利

用停缸技术功能和先进的发动机标定能可改善油耗，同时减少90%的NO_x排放。到2027年，OEM及其供应商将通过采用减少CO₂排放的技术来满足未来2027年的CO₂排放限值，继续改善发动机。

3.6 排放控制装置成本预估

为了支持CARB和EPA作为未来重型NO_x标准制定工作中关于成本效益分析的工作，MECA估算了本报告中建模的技术和正在测试的控制系统硬件成本（以2019年\$计）。成本评估结果由独立的第三方汇编，以代表整个后处理系统的一系列成本。值得注意的是，此处介绍的硬件成本仅代表OEM在发动机生产过程中所产生成本的一部分。完整的NREL分析预计将于2020年初发布。

在成本分析中，我们首先估算了图9中S1形式的排放控制系统的成本。成本估算基于在使用寿命（435,000英里）内FTP循环测试结果达到0.2g/bhp-hr的情况。系统硬件包括DOC，DPF和SCR催化剂，以及DEF尿素供给系统、OBD和控制器，系统硬件符合当前的OBD要求。我们估算了6-7L和12-13L两种发动机的成本。前者通常在4-6类重型车辆中应用，而后者则在7-8类重型车辆中应用。对于装备6-7L发动机的车辆，当前的后处理系统成本估计约为2,600美元至3,500美元。这比ICCT在2016年对五年前发布对类似系统的成本研究（4,152美元）估计的成本低约15%-38%（Posada, Chambliss和Blumberg, 2016年）。

对于装有12-13L发动机的8类牵引拖拉机，发动机和后处理硬件的成本在每辆卡车3500美元到4600美元之间。这比ICCT在2016年对五年前生产对类似系统成本研究中估计的成本低约10%-30%。ICCT报告显示，2015年美国或欧洲的废气排放控制系统（不包括EGR）的成本约为5,068美元，占卡车平均零售价157,000美元的成本的3%（Posada, Chambliss和Blumberg, 2016年）。值得注意的是，由于安全因素，运营和其他客户要求提高卡车制造商的安全性，重型线路卡车的平均价格历来以每年约1%的速度增长（Posada, Chambliss和Blumberg, 2016年）。同时，期望排放控制供应商通过改进制造和其他优化措施，每年将其组件的成本降低2-3%。供应链的同比减少可以解释我们2019年估算值与ICCT 2016年报告的大部分差异（468美元至1,568美元）。考虑到排放控制系统成本的下降，以及报道自2015年以来重型卡车的平均价格据已增加了8,000美元，排放控制系统成本已成为卡车总价格的一小部分。

对成本估算的第二部分，是在2027年达到FTP认证标准为0.02 g/bhp-hr和满足的LLC认证标准的排放控制装置的成本，其排放控制系统类似于图9中的S3。为了满足这些更严格的标准，技术的进步（在上文和我们的《2024年技术报告》中进行了讨论）包括对载体和催化剂的逐步改进，以及增加了一个带有辅热尿素供给装置的密闭SCR和尿素供给系统、NO_x传感器和氨传感器系统。此外，该分析还假定使用CDA和EGR冷却器旁路系统。所有这些技术目前都在CARB低NO_x示范计划中得到验证。我们编制了两个费用预算：一种假设了当前的耐用性和保修要求，另一种假设了CARB于2019年1月23日研讨会（CARB, 2019）提出的更长的耐用性和保修要求。这些要求是从2027年开始，对8级和550,000英里FUL分别提供100万英里的使用寿命（FUL）和800,000英里的保修，以及对4-7级的450,000英里的440,000英里的保修。从MY 2027开始分实施，并进一步

扩展MY 2031的要求。对于第8类车辆，2027年的要求为600,000英里FUL和450,000英里的保修，2031年为800,000英里的FUL和600,000英里。因此，我们预计以下提供的更长的FUL和保修期的成本估算将代表最终文件发布时的最高水平。最近，美国环保署在《清洁卡车倡议提议规则预告》（ANPR）中发出信号，表示他们将根据平均发动机更新间隔来考虑延长重型卡车的使用寿命。

对于配备6-7升发动机的车辆，在当今的耐用性和保修要求下，要满足FTP测试循环0.02g/bhp-hr的认证标准，以及将来的LLC标准所需的硬件增量改进，大约需要增加1,300美元至1,800美元，其中包括发动机和排放控制技术的成本。对于具有12-13升发动机的8类拖拉机，类似的增量改进估计将使MY 2027卡车的成本增加约1,500美元至2,050美元（不到1.2%），基于之前ICCT报告建议零售价的年增长率1%的估计约为177,000美元。

对于6-7L发动机，满足上述耐用性和保修要求的估计成本增量为1,800美元至2,450美元（根据2019年1月23日的建议）。对于具有12-13升发动机的8类拖拉机，这些增加的耐用性和保修要求估计将使排放控制和发动机技术的成本增加2,000美元至2,750美元。因此，到2027年，额外的排放控制总费用（包括满足0.02g/bhp-hr的FTP排气限制，LLC限制，100万英里的耐用性要求和800,000英里的保修），6-7升发动机为3,100美元至4,250美元，12-13升发动机的价格为3,550美元至4,800美元。如果假设2027年配备12-13升发动机的8类卡车的平均价格为\$ 177,000，根据先前报告的历史1%的年增长率，则该卡车排放控制的额外成本将占大约占汽车总价的2-2.7%。值得注意的是，成本估算是基于2019年1月23日CARB提出的100万英里FUL和800,000英里保修的提议，此提议已被减少为针对8类卡车满足800,000英里的使用寿命和600,000英里的保修。

4 燃料质量和催化剂耐久性因素

为减少重型柴油机排放，美联邦法规旨在允许采用工程系统方法，将先进的发动机设计、先进的排气控制技术和改善的柴油质量结合起来。在当前的柴油发动机法规中，燃料质量要求对燃料中的硫含量设置了限值。原因有两个：首先，当参与燃烧的燃料中存在硫时，产生的排放物中包含二氧化硫（SO_x）以及硫酸盐颗粒物；第二，二氧化硫的多种失活机理将影响柴油机排放控制部件中发现的贵金属和SCR催化剂的性能。基于对催化剂中的贵金属保护（PGM），建立了超低硫柴油中15 ppm限值。在存在硫的情况下，DOC和DPF的PGM氧化功能会随着时间而失活。DOC用于氧化来自发动机的NO₂，在适当的氧化条件下，NO₂可通过使用氨作为还原剂的SCR进行还原。同样，如果SCR上游DOC上的PGM将SO₂氧化为SO₃，这对SCR来说是更强的毒性，因为它位于DOC / DPF的上游，所以S2和S3中的前部SCR主要接触SO₂。

采用完善的热脱硫策略来逆转硫对这些催化剂的负面影响。通过利用专门设计的催化剂，DOC可以在350-600°C之间从硫中毒中恢复。尽管SCR催化剂通常可以耐受当今燃料中的硫，但长期接触硫化物可能通过两种潜在的中毒机制导致催化剂逐渐失活：较少发生的是硫酸与沸石催化剂修补基面涂层的不可逆反应；更常见的是，硫可以化学吸附在催化剂的活性位点上，并进一步阻止在活性位点发生NO_x还原反应。如果需要

恢复，铜基SCR在500°C下几乎可以完全恢复活性。DPF下游的SCR催化剂通常在DPF再生的周期性高温中完成恢复。

如上所述，满足2027 FTP和LLC标准的后处理体系结构将包括一个双SCR装置，该装置具有紧密耦合的SCR，位于后处理系统的上游。紧密耦合的SCR将主要接触于SO₂而不是SO₃。研究表明，可以通过将催化剂加热到500°C来逆转SCR的中毒现象，这可以通过燃油后喷或其他发动机热管理策略（包括停缸技术）来实现。在SwRI低NO_x测试程序中规定，全发动机老化至435,000等效里程的最后阶段，可以体现紧密耦合SCR的耐久性。

此外，EPA将与行业技术伙伴一起开发新的耐久试验计划，以体现相当于800,000英里等效使用寿命的加速老化和催化剂耐久性。该计划的结果将有助于展现燃料硫含量对SCR催化剂的长期影响。催化剂供应商的研究经验表明，迅速老化对紧密耦合的SCR的影响最大，因为它最靠近发动机，并且温度最高，且主要暴露在二氧化硫中。下游地板SCR在某种程度上受到DOC和DPF的保护，因此受燃料硫含量的影响最小。

同时，机油中发现的某些金属也会导致催化剂性能下降。润滑油中的磷是一种非选择性毒物，可有效掩盖各类催化剂表面活性部位。通常，磷大量沉积在催化剂的前端，并且通常主要残留在涂层的表面上。有人担心磷会与其他物质和催化剂涂层反应形成磷酸盐，该磷酸盐会持续存在于催化剂涂层上并掩盖催化剂活性（Bunting, More, Lewis, & Toops, 2004）。鉴于此，确定耐久性要求需要开展更多的研究工作，以满足催化剂未来的耐久性要求。针对磷中毒，未来可能的有效措施为增加催化剂的体积和/或加入抗毒催化剂。

在某些燃油、润滑油中发现的其他金属，例如生物柴油，包括钙，钠，钾和镁。钙均匀地沉积在整个催化剂上，并且可以物理上阻断催化剂活性点位。钠和钾含量升高会降低NO_x转化率和N₂选择性。目前，MECA没有发现任何数据表明镁对催化剂性能有负面影响。最近的研究表明了生物柴油金属污染物对排放控制系统影响的程度（Williams等，2011）（Lance等，2016）。NREL已在国家生物柴油委员会的资助和MECA的支持下，以10ppm金属杂质标准的生物柴油对轻型和重型后处理系统进行了测试。配备前SCR的轻中型货车后处理系统在使用掺杂目前的最多金属的燃料时，老化了150,000英里（加速英里）能够满足该车辆的FTP排放要求（Williams等，2014）。同样，在以后的研究中，采用类似的掺烧生物柴油燃料，以加速方式研究了如图9中的S1所示的2010款重型发动机后处理系统，完成了435,000等效英里的热老化后满足FTP老化后的排放要求（Lance等，2016）。

适用于超过435K的现场老化排气后处理系统的催化剂供应商正在尝试评估催化剂超出当前FUL耐久性的可能性。通过几辆卡车的测试结果表明，后处理系统在实际运行约700,000英里后，能够满足当前排放标准95%的NO_x转化率。未来的系统将需要满足更严格的NO_x排放要求，以获得更长的耐久性，并将进一步评估燃料对耐久性的影响。正如ANPR所报道的《清洁卡车倡议》那样，EPA已启动了一项测试计划，以编制加速的后处理耐久性协议，该协议将对后处理系统进行超出当前使用寿命的测试。

5.总结

EPA和CARB已经宣布开始制定法规，重点是修订重型卡车排放标准，尤其着眼于2024-2027年更严格的NO_x排放限制。本报告是对MECA在2019年6月10日发布报告的补充，其中我们对后处理系统关键零部件供应商（包括MECA成员）成熟化的技术进行了评估，以指导客户2024-2026年型号（MY）的产品在FTP测试循环满足0.05g/bhp-hr的要求。在此报告中，MECA展示了用于重型发动机的低成本技术，这些技术可减少NO_x和CO₂排放。到2027年，可在车辆上应用的先进技术，其生命周期内老化测试结果显示，在重型FTP认证循环测试结果可达0.02 g / bhp-hr，低负荷循环 (LLC)下可满足0.075 g/bhp-hr的NO_x排放限值。

重型发动机和车辆上部署的后处理系统可以有多种技术选择，来减少发动机排出的氮氧化物的同时提高燃油经济性，并降低卡车的总成本。由于第二阶段温室气体排放法规的发布，满足NO_x和CO₂标准的技术在近几年得到了极大的发展，OEM可以选择在2027年使用这些技术满足NO_x和CO₂排放标准。可以采用加热后处理并使其在所有发动机运行状态下保持高温技术手段来解决冷启动或低负载运行超标排放的问题。若能实现，这些技术可以通过为卡车车主节省燃油来降低车辆使用成本。

到2027年，在重型卡车上可以采用降低低温运行时间的排放控制策略，并结合改进的发动机标定、热管理和喷射控制，使排放控制系统在FTP测试工况下NO_x排放限值达到0.02g/bhp-hr，与此同时还能保持低N₂O排放。通过适度增加催化剂的应用，在保留2010款卡车的排放控制系统主要结构的前提下，可以实现更高的利润。为满足2027年NO_x限值而采用的方法利用了大家普遍熟悉的后处理系统设计，该设计在过去17年的轻型和重型NO_x法规经验积累的基础上，采用了技术上的进化改进。通过模型计算和发动机测试表明，具有CDA的发动机通过使用加热的尿素供给系统和基于NO_x与氨传感器的闭环控制，结合低温氨转化技术，可以实现低速低负载运行状态下低于0.075g/bhp-hr的NO_x排放。可以预见，在2027年实现8类运输卡车达到这些低NO_x排放限值所需的排放控制增量成本在1,500美元至2,050美元之间，估计在2027年该类卡车成本约177,000美元。

参考资料

- 40 CFR Parts 69, 80, and 86. (2001). Control of Air Pollution from New Motor Vehicles: Heavy-Duty Engine and Vehicle Standards and Highway Diesel Fuel Sulfur Control Requirements. *Federal Register*, 5002-5193.
- Allen, C. M., Joshi, M. C., Gosala, D. B., Shaver, G. M., Farrell, L., & McCarthy, J. (2019). Experimental Assessment of Diesel Engine Cylinder Deactivation Performance During Low-Load Transient Operations. *International Journal of Engine Research*. doi:<https://doi.org/10.1177/1468087419857597>
- Badshah, H., Posada, F., & Muncrief, R. (2019). *Current State of NOx Emissions from In-Use Heavy-Duty Diesel Vehicles in the United States*. Washington, DC. Retrieved from https://theicct.org/sites/default/files/publications/NOx_Emissions_In_Use_HDV_US_20191125.pdf
- Bruck, R., Presti, M., Holz, O., Geisselmann, A., & Scheuer, A. (2018). The Way to Achieve “CARB post 2023” Emission Legislation for Commercial Vehicles. *The 39th International Vienna Motor Symposium 26th - 27th April 2018*. Vienna.
- Bunting, B., More, K., Lewis, S., & Toops, T. (2004). Exhaust Phosphorus Chemistry and Catalyst Poisoning. *2004 Department of Energy Diesel Engine Emissions Reduction Conference*.
- CARB. (2015). *Draft Technology Assessment: Heavy-Duty Hybrid Vehicles*. Retrieved from https://ww3.arb.ca.gov/msprog/tech/techreport/hybrid_tech_report.pdf
- CARB. (2017, June 20). *Carl Moyer Program Guidelines*. Retrieved from CARB Web site: <https://www.arb.ca.gov/msprog/moyer/guidelines/current.htm>
- CARB. (2019). *California Air Resources Board Staff Current Assessment of the Technical Feasibility of Lower NOx Standards and Associated Test Procedures for 2022 and Subsequent Model Year Medium-Duty and Heavy-Duty Diesel Engines*. Retrieved from CARB Web site: https://www.arb.ca.gov/msprog/hdlownox/white_paper_04182019a.pdf
- CARB. (2019, January 23). *Heavy-Duty Low NOx Program Workshop: HD UL & Step 2 warranty*. Retrieved from CARB website: https://www.arb.ca.gov/msprog/hdlownox/files/workgroup_20190123/04-HD_UL_&_Step_2_warranty_WS01232019.pdf
- CARB. (2019, January 23). *Heavy-Duty Low NOx Program Workshop: Heavy-Duty In-Use Testing (HDIUT)*. Retrieved from CARB Web site: https://www.arb.ca.gov/msprog/hdlownox/files/workgroup_20190123/03-HDIUT_WS01232019.pdf
- Cummins, Inc. (2018, September 18). *Cummins Unveils the Future of Diesel with Low NOx and Low CO2 Emissions Technology During IAA Commercial Vehicles Show*. Retrieved from Cummins Newsroom: <https://www.cummins.com/news/releases/2018/09/19/cummins-unveils-future-diesel-low-nox-and-low-co2-emissions-technology>
- Hu, S., Howard, C., Quiros, D., Ianni, R., Sobieralski, W., Ham, W., . . . Huai, T. (2019). Overview of CARB’s Truck and Bus Surveillance Program (TBSP): Findings and Implications. *29th CRC Real World Emissions Workshop*. Long Beach.
- Joshi, M., Gosala, D., Allen, C., Srinivasan, S., Ramesh, A., VanVoorhis, M., . . . Koeberlein, E. D. (2018). Diesel Engine Cylinder Deactivation for Improved System Performance over Transient Real-World Drive Cycles. *SAE Technical Paper 2018-01-0880*. doi:<https://doi.org/10.4271/2018-01-0880>
- Lance, M., Wereszczak, A., Toops, T. J., Ancimer, R., An, H., Li, J., . . . McCormick, R. L. (2016, October 17). Evaluation of Fuel-Borne Sodium Effects on a DOC-DPF-SCR Heavy-Duty Engine Emission Control System: Simulation of Full Useful Life. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 9(3), 683-694. doi:10.4271/2016-01-2322
- McCarthy Jr, J. (2019). Meeting Future Low-Load Emissions Using Cylinder Deactivation to Achieve Simultaneous NOx and CO2 Reductions. *16th SAE Brasil Forum on Diesel and Alternative Technologies for Commercial and Off-Highway Vehicles*. Curitiba.
- MECA. (2018). *NOx Emission Reduction Benefits of Future Potential U.S. Mobile Source Regulations*. Retrieved from http://www.meca.org/resources/MECA_NOx_Modeling_Report_0618.pdf
- MECA. (2019). *Technology Feasibility for Model Year 2024 Heavy-Duty Diesel Vehicles in Meeting Lower NOx Standards*. Retrieved from http://www.meca.org/resources/MECA_MY_2024_HD_Low_NOx_Report_061019.pdf
- Navistar. (2016). *Final Scientific/Technical Report for SuperTruck Project: Development and Demonstration of a Fuel-Efficient, Class 8 Tractor & Trailer Engine System*. Retrieved from <https://www.osti.gov/servlets/purl/1460104>
- Neely, G., Sharp, C., Pieczko, M., & McCarthy, J. E. (2020). Simultaneous NOx and CO2 Reduction for Meeting Future CARB Standards Using a Heavy-Duty Diesel CDA-NVH Strategy. *SAE International Journal of Engines*, 13(2).
- Posada, F., Chambliss, S., & Blumberg, K. (2016). *Costs of Emission Reduction Technologies for Heavy-Duty Diesel Vehicles*. Washington, DC: International Council on Clean Transportation. Retrieved from <https://theicct.org/publications/costs-emission-reduction-technologies-heavy-duty-diesel-vehicles>

Sharp, C. (2019, April). CARB Low NOX Development and Demonstration Programs at SwRI Progress Update. Detroit, MI: WCX 19: SAE World Congress Experience.

Sharp, C. (2019, September 26). *Update on Heavy-Duty Low NOx Demonstration Programs at SwRI*. Retrieved from CARB: https://www.arb.ca.gov/msprog/hdlownox/files/workgroup_20190926/guest/swri_hd_low_nox_demo_programs.pdf?_ga=2.100136284.351866223.1572888176-1409525117.1552660276

Sharp, C., Webb, C. C., Neely, G., Carter, M., Yoon, S., & Henry, C. (2017). Achieving Ultra Low NOx Emissions Levels with a 2017 Heavy-Duty On-Highway TC Diesel Engine and an Advanced Technology Emissions System - Thermal Management Strategies. *SAE International Journal of Engines*, 10(4), 1697-1712. doi:<https://doi.org/10.4271/2017-01-0954>

Sharp, C., Webb, C. C., Neely, G., Sarlashkar, J. V., Rengarajan, S. B., Yoon, S., . . . Zavala, B. (2017). Achieving Ultra Low NOx Emissions Levels with a 2017 Heavy-Duty On-Highway TC Diesel Engine and an Advanced Technology Emissions System - NOx Management Strategies. *SAE International Journal of Engines*, 10(4), 1736-1748. doi:<https://doi.org/10.4271/2017-01-0958>

Sharp, C., Webb, C. C., Yoon, S., Carter, M., & Henry, C. (2017). Achieving Ultra Low NOx Emissions Levels with a 2017 Heavy-Duty On-Highway TC Diesel Engine - Comparison of Advanced Technology Approaches. *SAE International Journal of Engines*, 10(4), 1722-1735. doi:<https://doi.org/10.4271/2017-01-0956>

U.S. Department of Energy. (2018). *2018 Annual Merit Review Vehicle Technologies Office Results Report*. Retrieved from <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/11/f58/2018%20Vehicle%20Technologies%20Office%20Annual%20Merit%20Review%20Report.pdf>

U.S. EPA. (2016, October 25). Greenhouse Gas Emissions and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-Duty Engines and Vehicles -- Phase 2. *Federal Register*, pp. 73478-74274.

U.S. EPA. (2017, October 20). *Menu of Control Measures for NAAQS Implementation*. Retrieved from U.S. EPA Web site: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-02/documents/menuofcontrolmeasures.pdf>

U.S. EPA. (2017). *U.S. EPA 2014 NEI Version 1.0*. Retrieved from https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-04/documents/2014neiv1_profile_final_april182017.pdf

U.S. EPA. (2019, May 6). *Air Trends: Air Quality National Summary*. Retrieved from U.S. EPA website: <https://www.epa.gov/air-trends/air-quality-national-summary>

Williams, A., Luecke, J., McCormick, R. L., Brezny, R., Geisselmann, A., Voss, K., . . . Abi-Akar, H. (2011). Impact of Biodiesel Impurities on the Performance and Durability of DOC, DPF and SCR Technologies. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 4(1), 110-124. doi:10.4271/2011-01-1136

Williams, A., McCormick, R., Lance, M., Xie, C., Toops, T., & Brezny, R. (2014). Effect of Accelerated Aging Rate on the Capture of Fuel-Borne Metal Impurities by Emissions Control Devices. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 7(2), 471-479. doi:<https://doi.org/10.4271/2014-01-1500>

Zhang, C., Miller, E., Kotz, A., Kelly, K., & Thornton, M. (2019). *Characterization of Medium- and Heavy-Duty Vehicle Operations from In-Use Data: An Analysis of Starts, Soak Time, and Warm-Up Duration*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74725.pdf>