

关于车辆遥感标准中度量单位的技术考虑

作者 / 杨柳含子、Yoann Bernard 和 Tim Dallmann

背景

在许多大城市，机动车排放已经成为主要空气污染源之一。研究表明，车辆在实际行驶中的排放通常还会比实验室底盘测功机测试的认证值高出许多。事实上，有越来越多的证据表明，由于行驶工况循环和测试规程的局限性，台架或发动机底盘测功机实验并不能充分地反映实际行驶状况，并且还可能存在应用失效装置或是对测试车辆进行人为优化的情况¹。

目前，已经有各种能够测量车辆实际行驶排放的方法。其中最主流的是便携式排放测量系统（PEMS）和遥感检测，这两种方法各有其优势和弊端²。PEMS能够直接测量车辆在各种实际行驶状态下的排放情况，但比较耗时，并且对大量车辆开展测试的成本也非常高昂。遥感检测则是一项非常有发展前景的技术，该技术可以用于测量车辆实际行驶过程中的尾气排放，并且不会对交通产生任何影响。与PEMS技术相比，遥感检测技术可以在较短的时间内对大量车辆样本进行检测，且单车成本低廉。不过，遥感技术无法像PEMS那样对车辆连续行驶几公里期间的排放数据进行测量，遥感检测通常只能记录车辆通过瞬间的排放情况。

遥感检测在法规与合规监管中的应用

遥感技术从上世纪90年代起就被广泛用于研究领域。近年来，一些国家开始将遥感技术作为市场监管工具，用于识别高排放车队和车辆。中国和美国目前走在了遥感技术应用的最前端，两国都在示范如何将遥感技术应用于在用车合规监管中。2017年，中国生态环境部发布了《在用柴油车排气污染物测量方法及技术要求（遥感检测法）》标准，这是全世界第一次出台国家级的遥感管理标准。标准中设定了不透光度、林格曼黑度和一氧化氮（NO）排放限值，并规定了如何利用遥感检测判定车辆是否达标。其中，不透光度和林格曼黑度限值是强制性的，NO浓度限值则仅用于筛查高

1 Per Kågeson, *Cycle-beating and the EU test cycle for cars*, (European Federation for Transport and Environment: Brussels, 1998), http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/T&E%2098-3_0.pdf; Giorgos Mellios, Stefan Hausberger, Mario Keller, Christos Samaras, Leonidas Ntziachristos, *Parameterisation of fuel consumption and CO₂ emissions of passenger cars and light commercial vehicles for modelling purposes*, (European Commission Joint Research Centre Technical Report EUR 24927 EN: Luxembourg, 2011), http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/11111111/22474/1/co2_report_jrc_format_final2.pdf; Dana Lowell, Fanta Kamakaté, *Urban off-cycle NOx emissions from Euro IV/V trucks and buses*, (ICCT: Washington, DC, 2012), <http://theicct.org/urban-cycle-nox-emissions-euro-iv-v-trucks-and-buses>; Yoann Bernard, John German, Aikaterini Kentroti, Rachel Muncrief, *Catching defeat devices: How systematic vehicle testing can determine the presence of suspicious emissions control strategies*, (ICCT: Washington, DC, 2019), <https://theicct.org/publications/detecting-defeat-devices-201906>.

2 Yoann Bernard, Uwe Tietge, John German, Rachel Muncrief, *Determination of real-world emissions from passenger vehicles using remote sensing data*, (ICCT: Washington, DC, 2018), <https://theicct.org/publications/real-world-emissions-using-remote-sensing-data>.

www.theicct.org

communications@theicct.org

[twitter @theicct](https://twitter.com/theicct)

排放车辆。这是因为遥感技术只能测量尾气中的污染物浓度比率，例如NO与二氧化碳（CO₂）的比率，但并不能准确判断柴油车尾气NO浓度。因此，对中国和其他国家而言，采用一套可执行的柴油车NO排放浓度限值是推行遥感检测需要克服的主要障碍。

尽管如此，还是有越来越多的政府部门考虑利用遥感技术来实施柴油车排放管理，包括中国内地、中国香港和韩国。为了改进遥感技术在在用车达标监管中的应用，本文首先将剖析现有遥感技术无法精准评估柴油车尾气NO浓度的问题，接下来将讨论三种可供选择的替代方案。在三种方案中，我们认为将单位燃油的排放因子作为度量单位是利用现有遥感技术识别高排放车辆的最佳方式。

遥感技术的基础知识

大体上，遥感技术可以定义为无需物理接触测试车辆即可进行排放测量的系统。其中最常见的技术被称为“开放光路式”遥感，采用吸收光谱来测量在用车尾气烟羽中的污染物浓度。光源和探测器会被置于道路侧方或上方。设备方向是调节好的，因此光柱会在车辆通过并被探测器记录前透射尾气烟羽。另一种技术被称为“收集式”遥感。这种方式是通过收集车辆尾气烟羽样本，然后用实验室级的分析仪对样本进行测量。这两种方法都只能评估污染物与CO₂在尾气烟羽中的浓度比。本文中提到的局限性是两种技术类型都存在的，后文中提出的潜在解决方案也同时适用于“开放光路式”和“收集式”两种技术。

遥感系统通常用于测量一氧化氮（NO）、一氧化碳（CO）、碳氢化合物（HC）和二氧化碳（CO₂）。颗粒物（PM）排放则是通过烟羽不透光度来间接测量的。二氧化氮（NO₂）、二氧化硫（SO₂）和氨（NH₃）排放也可以通过遥感系统进行测量³。这些污染物在空气中的稀释规律都是相似的，这些污染物与二氧化碳（CO₂）的比率在烟羽中也是足够稳定的。

如果不能将排放数据和车辆信息结合在一起，排放数据本身的价值是相对有限的。车辆信息包括车辆被测量时的运行状况。因此，遥感系统需要和其他附加设备组合应用，才能在测试时获得全部所需的车辆信息。例如，利用摄像头记录车辆号牌，用于从车辆登记注册数据库中获取车辆品牌、车型、燃油类别、发动机型号以及排放标准等信息。另外，还需要测量车辆速度和加速度的设备，从而判断车辆在进行排放测试时的发动机负载。最后，传感器用于测量周围环境条件，例如风速、温度、气压和相对湿度。

世界各地的遥感应用情况

遥感技术的应用非常广泛，目前至少已有27个国家开展了遥感检测。在这些国家中，有四分之三以上都利用遥感数据来监测车队排放，约有不到四分之一的国家利用这些数据开展研究，例如判定排放劣化系数和评估不同技术类型车辆的实际排放性能。遥感技术另一个最常见的用途就是帮助识别出排放过高或排放较低的单车或车队。在美国、中国内地、中国香港、韩国、加拿大、墨西哥、奥地利、伊朗、保加利亚、德国、西班牙和丹麦都已经或即将开展遥感监测项目，利用遥感技术识别高排放车辆。通过识别筛查，可以及早发现需要进行定期技术检测的车辆并对高排放车辆采取达标管理措施，同时还能发现作弊篡改车辆的情况⁴。下面将介绍利用遥感技术进行机动车排放控制的范例。

» 2017年，中国发布了《在用柴油车排气污染物测量方法及技术要求（遥感检测法）》标准，这是全世界第一个国家层级的遥感管理标准⁵。该标准替代了所有地方性柴油车遥感监测标准，并且适用于所有柴油车，包括轻型车和重型车。该标准中制订了检测技术规程和推荐限值，如果地方管理部门目前已经或决定开展遥感检测项目，则需要遵守该标准。标准通过不透光度和林格曼

3 Tim Dallmann, *Use of remote-sensing technology for vehicle emissions monitoring and control*, (ICCT: Washington, DC, 2018), <http://www.theicct.org/publications/remote-sensing-briefing-dec2018>.

4 Yoann Bernard, John German, Rachel Muncrief, *Worldwide use of remote sensing to measure motor vehicle emissions*, (ICCT: Washington, DC, 2019), <http://www.theicct.org/publications/worldwide-use-remote-sensing-measure-motor-vehicle-emissions>.

5 Zifei Yang, *Remote-sensing regulation for measuring exhaust pollutants from in-use diesel vehicles in China*, (ICCT: Washington, DC, 2018), <http://www.theicct.org/publications/remote-sensing-regulation-measuring-exhaust-pollutants-use-diesel-vehicles-china>.

黑度规定了颗粒物（PM）的排放限值（见表1）。对于一氧化氮（NO），标准中的限值仅用于筛查高排放车辆，然后进行进一步检查。如果车辆在6个月内连续两次或两次以上在遥感检测中出现同一污染物超标，则被视为不达标。在开展遥感检测项目的城市中，如果发现车辆不符合不透光度或林格曼黑度限值，则可能会对该车辆进行处罚并要求车主对车辆进行维修，具体情况取决于各地的具体规定。例如，在北京，如果未能通过遥感检测标准，管理部门将向车主发出警告，要求其立即进行维修，并要求其随后到检测维修场（I/M）进行确认检测。收到警告的车主也有机会对检测结果提出质疑，如果车辆在维修后仍未通过确认检测，车主将受到处罚。

表1. 中国柴油车遥感检测排放限值

污染物	限值
不透光度*	30%
林格曼黑度**	I级 (20%)
一氧化氮***	1500 ppm

注:

*通过尾气烟羽对绿光的吸收百分比来测量不透光度（波长范围550-570纳米）。

**林格曼黑度是反映烟度浓度的一项指标，将烟度黑度与林格曼分级进行比较。林格曼黑度共分为6级。分级是根据黑色条格占白色表面的面积比例来确定的，如果隔开一定的距离观察，这些条格将融合为灰色阴影。0级烟度为全白，5级烟度为全黑。1级到4级黑色条格面积占比从20%增加至80%，即10平方微米面积内黑度线条宽度分别为1微米、2.3微米、3.7微米和5.5微米。车辆烟度是由摄像头抓拍的，并与林格曼黑度进行比较。

***NO限值仅用于筛查高排放车辆。

» 中国香港自2014年开始将遥感检测作为筛查高排放车辆的达标管理工具。但是与中国内地的遥感标准不同，香港的管理标准仅适用于汽油和液化石油气（LPG）车辆，污染物方面设置了一氧化氮、一氧化碳和碳氢化合物浓度限值。检测时，两组遥感检测设备被放置在相距非常近的位置（行车时间1秒）⁶，如果两套设备同时测量出某辆车排放超出规定的浓度限值，则该车辆会被判定为不达标。标准中的限值是基于大量遥感检测数据和底盘测功机实验数据决定的（限值详见表2）⁷。不达标车辆会被要求进行维修并在12个工作日内前往指定检测机构进行检测。若未进行维修，则车辆证照将被暂扣且不允许上路行驶。

6 在车速约40公里/小时条件下，这个距离约为10米。

7 Yuhan Huang, Bruce Organ, John L. Zhou, Nic C. Surawski, Guang Hong, Edward F.C. Chan, Yat Shing Yam, "Remote sensing of on-road vehicle emissions: Mechanism, applications and a case study from Hong Kong," *Atmospheric Environment* 182 (2018): 58-74. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.035>

表2. 香港汽油和LPG轿车遥感检测排放限值

排放标准	NO (ppm)	CO (%)	HC (ppm)
欧1前	4000	5	500
欧1	2000	2	500
欧2	1500	2	500
欧3	750	2	500
欧4	750	2	500
欧5	750	2	500
欧6	750	2	500

- » 韩国自2013年开始利用遥感检测筛查高排放车辆，共设有39个不同的检测点，每年可检测两三百万辆。韩国遥感检测法规只适用于测试汽油和LPG车辆的碳氢化合物、一氧化碳及一氧化氮排放，限值也是以尾气污染物浓度来限定的。当车辆第一次被测量出排放过高时，车主会收到一封告知邮件并建议车主对车辆进行检查。如果同一辆车第二次被测量出排放过高，车主将会收到维修指令，车主必须停止使用该车辆并在收到维修指令之日起15日内前往指定的I/M检修机构对车辆进行维修，否则将会面临罚款。在筛查高排放车辆时，遥感检测的限值为车辆定期检测标准限值的3倍。
- » 遥感检测在美国已经开展了近30年。尽管最初只是用于研究和车辆排放监测，但一些州如印第安纳、马萨诸塞、德克萨斯和弗吉尼亚都已经开展了遥感检测项目，通过遥感技术来筛查出排放最差的车辆并要求这些车辆进行维修。如果车辆在正常行驶工况下反复出现排放超出规定排放上限的情况，则会向车主发出通知。遥感法规排放限值对于老旧车辆比较宽松，对于较新的车辆比较严格，这是根据车辆定期检测时所适用的底盘测功机排放实验（即IM240）限值来规定的。与香港和韩国类似，目前美国的遥感检测项目也不用于筛查高排放柴油车。在美国，有些州还会利用遥感检测来识别出排放很低的清洁车辆，称谓“清洁筛选”项目。运行正常且排放清洁的车辆可以豁免下一次年度排放检测。
- » 在欧洲，遥感主要用于开展研究、监测车队排放以及发现车辆作弊篡改情况。目前欧洲并没有将遥感技术作为车辆定期检测的辅助手段。

综上所述，中国香港和韩国的遥感检测法规只适用于汽油和LPG车辆的管理，中国的柴油车遥感法规设定了一氧化氮限值，用于筛查排放过高的车辆。

利用遥感测量柴油车尾气的技术障碍

如上所述，目前世界上没有在用车遥感检测法规对柴油车设置强制性NO限值，这是因为目前的遥感技术无法准确测量柴油车的尾气污染物浓度：污染物通过尾气烟羽的精确光程是未知的，并且污染物一旦离开排气管就会迅速扩散。

目前，柴油车尾气污染物浓度是根据测量出的污染物与二氧化碳比率，再乘以从燃烧方程式中得出的二氧化碳浓度，最终计算得出的。汽油和LPG发动机都属于点燃式发动机，通过火花塞点燃预先混合的油汽混合气，燃烧过程通常可接近理论空燃比。在这样的情况下，只要发动机运转正常，尾气中的干二氧化碳浓度（去除的水蒸气）会保持在接近15%。同时对一氧化碳和碳氢化合物进行测量，就可以计算出未完全燃烧成为二氧化碳的燃油量，从而更准确地评估尾气污染物浓度。然而，柴油发动机的燃烧模式是对燃料进行压缩点燃，因此始终处于空气过量的状态。并且，过量空气量随发动机运行参数的不同而变化很大，同时还会受到车辆出厂排放系统标定和发动机控制方案设计的影响。在这样的稀燃运行条件下，尾气中会含有过量的氧气。柴油车尾气中的二氧化碳浓度通常为1%到13%不等，在极少数情况下，在后处理设备再生期间，可达到15%。

利用遥感技术测量尾气浓度的假设前提是所有氧气已在燃油燃烧过程中被消耗：尾气中已没有剩余氧气且二氧化碳浓度为15%⁸。如上文所述，这一假设条件对于点燃式发动机（汽油机）基本是成立的，但对于压燃式发动机（柴油机）并不成立。

污染物质量排放率为何重要

通常，轻型车排放标准限值会规定单位行驶里程的污染物排放质量（例如：克/公里），重型车排放标准限值会规定单位机械能量输出的污染物排放质量（例如：克/千瓦时）。这些度量单位被认为最适用于评估运输人员或货物时排放的污染物质量，从而判定单车排放所造成的环境影响。为了获得这些参数，需要测量污染物的质量排放率。污染物质量排放率的基本公式如下所示，质量排放率与污染物浓度成正比，也与总排气质量流量成正比。

$$\text{污染物质量排放率} = \mu \times \text{尾气污染物排放浓度} \times \text{尾气质量流量}$$

在上面的公式中， μ 是各项污染物在尾气总量中的比率，这主要取决于所研究的污染物和所使用的燃料。

成本高昂且耗时较长的实验室或PEMS测试都要求从尾气管中提取密封样本来测量尾气质量流量。相比之下，遥感检测无法获取尾气质量流量数据。在车辆定期检测过程中，最大的限制就是单车测试的成本和时长，因此想要达到型式核准测试时的准确度是不现实的⁹。车辆定期检测并不是为了确认车辆是否符合型式核准限值，而是为了检测车辆是否存在故障。

如上文公式所示，尽管质量排放量与尾气污染物浓度呈函数关系，但使用污染物浓度来评估车辆污染物排放水平的主要限制在于缺少尾气质量流量方面的信息。特别是，当在类似条件下（例如，相同的功率需求）进行测试时，配备柴油发动机的车辆往往比大多数配备汽油发动机的车辆的尾气质量流量更大，这主要是因为柴油机运转时会存在大量过量空气¹⁰。换言之，即使汽油车和柴油车的尾气浓度相似，柴油车排放出的污染物质量也会更大。这意味着基于尾气污染物浓度的检测方案应至少根据发动机技术规格来调整规定限值。

为遥感检测设定有效限值

关于改进遥感测量柴油车一氧化氮的问题，我们在下文中将讨论三种可能的方案：（1）利用模型反演尾气中的二氧化碳浓度；（2）测量尾气烟羽中氧气与二氧化碳的相对含量然后计算二氧化碳浓度；（3）用浓度比率（一氧化氮与二氧化碳的比率）或单位燃油的排放因子（克/千克燃油消

8 Huang et al., "Remote sensing of on-road vehicle emissions," 58-74. Additionally, pollutant ratios to CO₂ and fuel-specific emission factors do not rely on any assumptions regarding stoichiometric combustion.

9 测试要求专门的尾气流采样环节并进行底盘测功机负载实验。目前，美国的IM240检测是唯一已知的样例，可以直接将车辆定期检测与型式核准排放标准进行对比。

10 在相同的动力需求下，由于燃烧效率的提高，柴油机比同等大小的汽油机燃烧的燃料可能少约10%。虽然消耗的燃料略少，但柴油机的尾气流量却比汽油机高出很多，这主要是由于柴油机在燃烧过程中需要额外的新鲜空气导致的。

耗) 作为遥感检测法规限值的单位。在上述三个方案中, 我们认为以单位二氧化碳或单位燃油的排放因子作为度量单位是利用遥感技术来识别高排放车辆的最佳方案, 并且该方法可以同时适用于汽油车和柴油车。

柴油车尾气二氧化碳 (CO₂) 浓度反演

第一种方案是根据车辆的动力参数和其他特征估算出尾气中的CO₂浓度, 一些研究机构和遥感设备供应商正在研究这种方案的可行性。其优点是, 如果能够足够准确地评估出尾气中的CO₂浓度, 就可以通过尾气烟羽中污染物与CO₂的比值, 推算出尾气污染物排放浓度。然而, 这种方案的明显缺点就是尾气污染物浓度的准确性直接取决于尾气CO₂浓度反演模型的精度。

测量尾气中氧气 (O₂) 与二氧化碳 (CO₂) 的比率

第二种方案是测量尾气烟羽中O₂与CO₂的相对比率, 理想情况下应靠近排气管进行测量, 这样就可以确定尾气的空气稀释率, 重新计算排放浓度。若能准确测量O₂与CO₂的相对量, 就可以像测量汽油机那样去测量柴油机的污染物排放浓度。然而, 目前尚没有成熟的技术来测量O₂与CO₂的相对量。一些遥感设备供应商正朝着这个方向努力¹¹。

如果上述两种方案中的任何一个能够成功地评估尾气排放浓度, 那么目前中国的柴油车遥感检测限值都将需要大幅加严。这是因为目前使用的评估方法是基于汽油车尾气CO₂浓度的假设前提, 在这种假设条件下, 柴油车尾气排放浓度会被高估。而一旦可以对柴油车尾气CO₂浓度进行准确评估, 若不对限值进行大幅加严, 由于柴油车尾气排放比汽油车尾气排放稀释度更高, 柴油将被允许排放更多的污染物(按质量计)。一旦准确评估了污染物浓度, 一些无法通过当前检测的柴油车就可能通过检测, 这将削弱遥感法规的管理力度。此外, 即使可以准确地评估或测量CO₂浓度, 车辆生产企业也可以通过标定将柴油机尾气的稀释度完美地控制到所需的量, 这可能会导致车辆与车辆之间产生很大的差异。车辆生产企业可能会因此而增加尾气流量(例如, 使用更多空气), 因为这可以使得污染物浓度下降, 但这并不一定会降低污染物排放总质量。而在评估柴油车污染对空气质量的影响时, 确定真实排放质量才是最重要的。

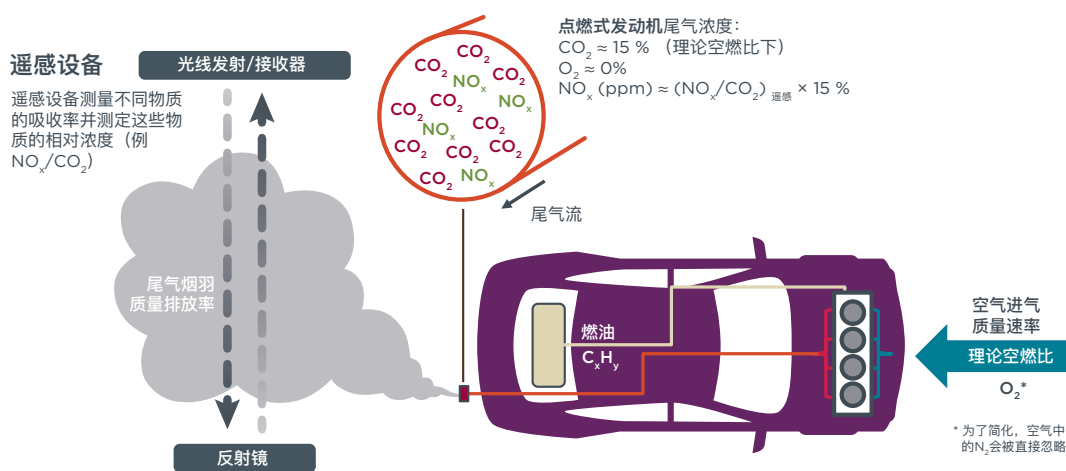


图1. 遥感设备测量点燃式发动机车辆尾气排放示意图

图2展示了如何通过尾气烟羽测量压燃式发动机的柴油车尾气排放。在CO₂和污染物排放质量与图1完全相同的情况下, 由于稀燃要求更多的新鲜空气参与燃烧, 会增加尾气气流的排放速率并因此降低污染物排放浓度。但在这两种情况下, 污染物与CO₂的比例是保持不变的, 并不受测量位置(排气管测量或是尾气烟羽测量)的影响。

11 Xuechun Yu, Current Status and Development Trend of Remote Sensing Technology for Vehicle Emissions in China, Dopler Eco-technologies Co., Limited presentation at Vehicle Emission Remote Sensing Symposium (Hong Kong), 2018, July 26.

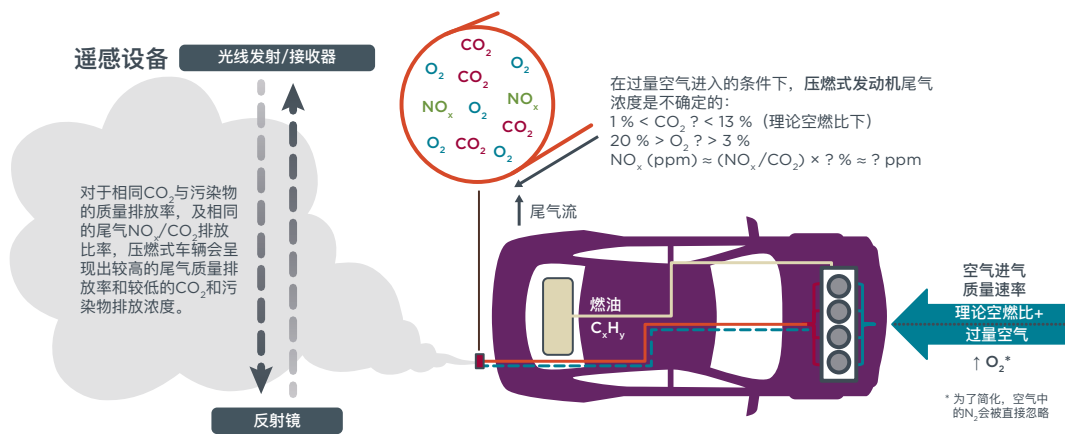


图2. 遥感设备测量压燃式发动机车辆尾气排放示意图

不过，需要注意的是，虽然单位燃油或二氧化碳排放因子限值同时适用于柴油车和汽油车，但却并没有考虑在同等技术水平下柴油车通常比汽油车更节能的实际问题。在同等动力输出需求下，柴油车可比汽油车节油约10%，CO₂排放也比汽油车少约10%。尽管这种差异并不大，我们将在下一节中讨论可能解决上述差异的解决方案，该解决方案需要了解测试车辆的一些其他信息。

表3总结了上述三种解决方案各自的优点和缺点。

表3. 三种柴油发动机污染物限值单位的优点和缺点

遥感度量单位	优点	缺点
反演尾气中的CO ₂ 浓度	<ul style="list-style-type: none"> 如果尾气中的CO₂评估准确则可获得污染物浓度。 	<ul style="list-style-type: none"> 削弱了现有限值的效力。生产企业可以通过不同方式控制柴油车尾气稀释度。
测量尾气烟羽中O ₂ 和CO ₂ 的相对量，来计算尾气中的CO ₂ 浓度	<ul style="list-style-type: none"> 如果尾气中O₂与CO₂的相对量评估准确则可计算出污染物浓度。 	<ul style="list-style-type: none"> 削弱了现有限值的效力。生产企业可以通过控制柴油机尾气稀释度而实现达标。 目前尚没有成熟的技术可以测量O₂与CO₂的相对量。
以燃油为基准的度量单位	<ul style="list-style-type: none"> 适用于现有遥感技术。 允许管理部门保持现有的标准严格度。 	<ul style="list-style-type: none"> 不能直接与车辆定期检测中的尾气浓度限值进行比较。 没有考虑车辆之间的燃油经济性/CO₂排放差异。

最佳方案

与使用浓度限值相比，我们认为以单位燃油的污染物排放质量作为度量单位是识别高排放车辆的最佳方法，特别是在我们对被测车辆知之甚少时，例如不确定是汽油车还是柴油车的情况下。但对于单位燃油的排放限值，我们仍需要开展更多的研究来确定合适的排放限值。目前，所有的遥感设备都是在假定柴油车尾气没有被稀释的错误前提下来计算尾气排放浓度。为了保持当前中国遥感标准中1500ppm限值的严格性，我们建议将现有的遥感浓度限值转换为单位燃油的排放因子限值。根据遥感设备供应商的假设，目前1500ppm的尾气排放浓度相当于燃烧每千克柴油或汽油排放氮氧化物(NO_x) 32.3g。此转换的详细计算过程详见附件。

在没有预设尾气浓度限值的情况下，如果地方管理部门希望通过遥感检测来筛查在用车中的高排放车辆，就需要自行定义排放阈值上限。例如，对于一个初步的遥感检测方案，可以先简便地设定一个排放上限点，例如各项污染物排放范围的95%高点。

为轻型车设置单位距离的排放限值

如上文所述，当需要更精确地比较燃油经济性差异较大的车辆时，以单位燃油的排放因子作为单位的方法就会受到局限。对于NO和其他污染物，所有燃油类型和排放标准相同的乘用车都应满足同样的单位距离的排放限值，即克/公里，因为这样的限值单位是不受单车油耗影响的。在其他条件相同的情况下，油耗较低且CO₂排放较少的车辆反而单位燃油污染物排放率会更高，如果直接比较单位燃油的排放率则会对那些CO₂排放较少的车辆不利，并鼓励了CO₂排放较高的车辆。

为了解决这一问题，我们在早先的一份报告中提出了一种将单位燃油的排放量换算为单位距离排放量的方法¹²。该方法需要使用型式核准油耗和消费者报告的实际行驶油耗信息，对车辆的燃油经济性和CO₂排放量进行合理评估。每个车型需要经过多次遥感测量后对单位燃油的排放量进行平均，然后再依照下列公式进行计算：

$$\text{污染物 (g/kg)} = \text{平均值 (污染物 (g) / 燃油 (kg))}$$

$$\text{污染物(g/km)} = \text{平均值} \left(\frac{\text{污染物(g)}}{\text{燃油(kg)}} \right) \times \frac{\text{燃油(kg)}}{\text{CO}_2(\text{g})} \times \text{实际行驶 CO}_2(\text{g/km})$$

这种方法允许我们为每一款被测量车型定义特定的限值。由于采用了相同的度量单位，这种基于单位距离排放量的实际行驶排放测量结果可以用于直接和型式核准排放限值进行比较。

最后，排放标准通常是对氮氧化物（NO_x）进行限制，而不仅仅是NO。对于柴油车而言，一次NO₂的排放量变化幅度范围很大，最高可以占到NO_x总量的50%¹³。因此，我们建议未来柴油车遥感法规除了测量NO外，还需要对NO₂进行测量。

结论

遥感检测能够测量汽车尾气中污染物与CO₂的比值，但目前尚不能准确评估稀燃车辆特别是柴油车的尾气污染物排放浓度。目前的遥感设备是在假设没有过量空气的理论燃烧前提下对尾气浓度进行评估，但这只是点燃式发动机的典型燃烧状况。因此，目前的遥感检测法规，包括中国的法规标准中只定义了一个NO筛查限值，但并非强制性限值。

本文中讨论了三种可能解决上述问题的方案：（1）根据车辆特性反演尾气中的CO₂浓度；（2）测量尾气中O₂与CO₂的相对浓度；（3）以浓度比率（NO与CO₂相对浓度）或单位燃油的排放因子（g/kg燃油）为度量单位来规定法规限值。

对于前两种方法，目前尚没有成熟的技术可以精确地模拟CO₂浓度或测量O₂与CO₂的相对浓度。而一旦有了这样的技术，就需要对现有的柴油车尾气排放限值进行大幅加严，以避免削弱目前排放限值的管理效力。然而，如果只是为了筛查出高排放车辆，以单位燃油的排放因子作为度量单位是比较合适的，并且该方法可同时适用于汽油车和柴油车。由于单位燃油的排放限值要优于目前采用的浓度限值，中国的遥感标准可以考虑修订为单位燃油的排放限值。目前标准中1500ppm的NO尾气浓度限值是根据加载减速（Lug-down）和ESC工况测试得出的，可以等效转换为每千克燃油排放32.3克NO的限值。对于液化石油气（LPG）车辆，限值可调整为每千克燃料排放34克NO。为了将遥感测量结果与型式核准限值进行比较，可以将单位燃油的排放结果估算为单位距离的排放因子，但这种转化需要提供额外的测试车辆信息。目前，欧洲正在开发车载油耗监测，中国国VI标准中也引入了远程OBD管理要求，这些进展为解决实际道路油耗报告开辟了新的途径。

12 Yoann Bernard, Uwe Tietge, John German, & Rachel Muncrief, Determination of real-world emissions from passenger vehicles using remote sensing data, (ICCT: Washington, DC, 2018), https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/TRUE_Remote_sensing_data_20180606.pdf

13 低里程状态下柴油车氧化催化器和带有涂层的DPF都会导致NO₂/NO_x比率较高。

将CO₂浓度限值转换为单位燃油的排放限值

我们以目前中国遥感标准中1500ppm的NO_x限值为例，为了简化计算，我们采用化学式为CH_r的非氧化汽油或柴油，其中r是氢分子和碳分子的比率。中国燃油的氢碳分子比率r约为1.86¹⁴。

在理论空燃比完全燃烧状态下，尾气中的CO₂理论浓度为：

$$\text{尾气湿CO}_2\text{浓度} = \frac{1}{4.76 + 1.44 \times r}$$

若去除尾气中的水蒸气，遥感检测的干CO₂浓度应为：

$$\text{尾气干CO}_2\text{浓度} = \frac{1}{4.76 + 0.94 \times r}$$

NO与CO₂的质量比为：

其中：

MCO₂是二氧化碳的分子质量，为44g/mol；

MNO₂是二氧化氮的分子质量，为46g/mol¹⁵。

最后，单位质量燃油排放出的CO₂质量为：

$$\frac{\text{NO质量(以NO}_2\text{计)(g)}}{\text{CO}_2\text{质量(kg)}} = \frac{\text{NO浓度} \times \text{MNO}_2}{\text{CO}_2\text{浓度} \times \text{MCO}_2} \times 1000$$

其中：

MC是碳的分子质量，为12g/mol；MH是氢的分子质量，为1g/mol。

表A1的第二行将1500ppm的NO_x尾气浓度限值转换为遥感测量的模式，即NO_x与CO₂的相对浓度比，其结果约为98 (ppm/%)。第三行将限值转化为污染物与CO₂的质量比，结果约为10g/kg。香港的研究人员在研究如何利用遥感测定柴油车排放并设定限值时也建议采用上述计量单位。研究人员根据认证标准提出了不同的NO_x/CO₂的排放限值，对于欧4车辆来说，排放限值约为57 (ppm/%)，对于欧5车辆来说，排放限值约为23 (ppm/%)¹⁶。

根据污染物与CO₂的比率可以计算出单位燃油的排放因子。这种度量单位的优点是能够在测量时考虑不完全燃烧的状况（未燃烧的燃油没有完全转化为CO₂，而是在燃烧残余物中产生大量的CO和HC）。因此，我们建议采用单位燃油的排放限值，这样可以在不考虑其他燃烧副产物（例如CO）的情况下更好地将车辆的某项污染物排放量（例如NO_x）与其他车辆的排放量进行比较。

根据车辆的遥感测量结果，单位燃油的NO_x排放率计算方法如下：

$$\frac{\text{NO(以NO}_2\text{计)(g)}}{\text{燃油(kg)}} = \frac{\text{MNO}_2(\text{g/mol}) \times \text{NO/CO}_2\text{浓度比率}}{1 + \text{CO/CO}_2\text{浓度比率} + 6 \times \text{HC/CO}_2\text{浓度比率}} \times \frac{1000}{\text{MC(g/mol)} + r \times \text{MH(g/mol)}}$$

14 国家质量监督检验检疫总局，GB/T 19233-2008《轻型汽车燃料消耗量试验方法》。

15 NO排放量采用NO₂的分子质量，因为所有排放出的NO都被氧化成NO₂。

16 Yuhan Huang, Bruce Organ, John L. Zhou, Nic C. Surawski, Yat-shing Yam, Edward F.C. Chan, "Characterisation of diesel vehicle emissions and determination of remote sensing cutpoints for diesel high-emitters," Environmental Pollution 252 (Part A), 31-38, doi: 10.1016/j.envpol.2019.04.130

1500ppm的NO尾气浓度限值转换成单位燃油的NO₂（NO氧化后）排放率后约为32g/kg。

液化石油气（LPG）的碳含量比汽油或柴油要低，其氢碳比r约为2.62。这意味着在质量一定的情况下，LPG燃烧产生的CO₂比汽柴油低5%，同时释放出的能量比汽柴油高7%。因此，在设定定量燃料度量单位时，不能将汽柴油标准照搬到LPG上。对于后者，应将限值设置得稍微宽松一点，即每千克燃料可排放34克NO¹⁷。

表A1. 汽柴油及LPG车辆尾气浓度限值转换为单位CO₂和单位燃料为度量单位后的限值

	柴油和汽油	LPG
NO尾气浓度限值(ppm)	1500	1500
NO限值转换为NO/CO ₂ 限值(ppm/%)，即遥感测量结果	97.6	108.4
NO限值转换为NO即NO ₂ /CO ₂ 限值(g/kg)	10.2	11.3
NO转换为NO即NO ₂ /燃油限值(g/kg)	32.3	34.0

17 可采用0.7g/MJ燃料能量的NO排放限值，即可同时适用于柴油、汽油和LPG。