



Final Report:

混合动力和电动公交车实际运行情况 评估报告

基于大规模运营的混合动力和纯电动公交车环境和经济性能评估



Author(s):
Jürg Grütter, Grütter Consulting AG

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------|
| Date of the Report: 22/02/2015 | Contract Number: 2014.01 |
| Institution: Grütter Consulting AG | Country: international |

Prepared by:

Institution XY

Grütter Consulting AG

Thiersteinerstr.22, 4153 Reinach, Schweiz

Tel: ++44 208 5637 463; jgruetter@gmail.com; www.transport-ghg.com



With the Support of:

REPIC Platform

c/o NET Nowak Energy & Technology AG

Waldweg 8, CH-1717 St. Ursen

Tel: +41(0)26 494 00 30, Fax: +41(0)26 494 00 34, info@repic.ch / www.repic.ch

The REPIC Platform is a mandate issued by the:

Swiss State Secretariat for Economic Affairs SECO

Swiss Agency for Development and Cooperation SDC

Swiss Federal Office of Energy SFOE

The author(s) are solely responsible for the content and conclusions of this report.

混合动力和电动公交车实际运行情况 评估报告

基于大规模运营的混合动力和纯电动公交车环境和经济性能评估

Jürg M. Grütter
Grütter 咨询公司
2014 年 12 月

jgruetter@transport-ghg.com
www.transport-ghg.com

目录

| | |
|-----------------------------------|----|
| 目录 | 2 |
| 缩写 | 4 |
| 1. 前言 | 5 |
| 1.1. 背景 | 5 |
| 1.2. 目标 | 5 |
| 1.3. 内容 | 6 |
| 1.4. Repic 机构和 Grütter 咨询公司 | 6 |
| 2. 比较城市 | 6 |
| 2.1. 介绍 | 6 |
| 2.2. 城市概述 | 7 |
| 3. 公交车的发动机/燃料技术 | 9 |
| 3.1. 前言 | 9 |
| 3.2. 混合动力公交车 | 9 |
| 3.3. 电动公交车 | 10 |
| 3.4. 混合动力和电动公交车的市场渗透率 | 11 |
| 4. 混合动力公交车运行评估 | 13 |
| 4.1. 介绍 | 13 |
| 4.2. 混合动力公交车的环境评价 | 15 |
| 4.2.1. 文献总结 | 15 |
| 4.2.2. 波哥大混合动力公交车的环境评价 | 17 |
| 4.2.3. 郑州混合动力公交车的环境评价 | 19 |
| 4.3. 混合动力公交车的经济性分析 | 23 |
| 4.3.1. 前言 | 23 |
| 4.3.2. 公交车辆有效运行里程 | 23 |
| 4.3.3. 车辆购买与运营成本 | 24 |
| 4.3.4. 盈利性 | 24 |
| 4.4. 混合动力公交车评估总结 | 28 |
| 5. 电动公交车运行评估 | 28 |
| 5.1. 前言 | 28 |

| | |
|----------------------------|----|
| 5.2. 电动汽车的环境评价 | 31 |
| 5.2.1. 郑州电动汽车环境评价..... | 31 |
| 5.2.2. 深圳电动公交车的环境评估 | 32 |
| 5.2.3. 电动公交车环境影响评估结论 | 33 |
| 5.3. 电动公交车的经济性 | 34 |
| 5.3.1. 前言 | 34 |
| 5.3.2. 公交的有效行驶里程 | 34 |
| 5.3.3. 车辆购置与运行成本 | 34 |
| 5.3.4. 盈利性 | 35 |
| 5.4. 电动公交车结论..... | 35 |
| 6. 气候融资机会 | 36 |
| 7. 结论..... | 37 |
| 参考文献..... | 38 |

缩写

| | |
|--------|--------------|
| AC | 空调 |
| ADB | 亚洲开发银行 |
| AFD | 法国发展署 |
| BM | 容量边际 |
| BRT | 大容量快速公交 |
| CAF | 安第斯开发协会 |
| CDM | 清洁发展机制 |
| CM | 综合毛利 |
| CNG | 压缩天然气 |
| CTF | 气候技术基金 |
| EEV | 环境友好型车辆 |
| FOEN | 瑞士联邦能源办公室 |
| GEF | 全球环境基金 |
| GHG | 温室气体 |
| GPS | 全球定位系统 |
| ICCT | 国际清洁交通委员会 |
| ICE | 内燃机 |
| IDB | 泛美开发银行 |
| IEA | 国际能源署 |
| IPCC | 政府间气候变化专门委员会 |
| IRR | 内部收益率 |
| LNG | 液化天然气 |
| NAMA | 国家自愿减排行动 |
| NCV | 净卡路里值 |
| NBFL | 新伦敦巴士 |
| OM | 营业毛利 |
| PM | 颗粒物 |
| RFID | 射频识别 |
| SDC | 瑞士发展合作署 |
| SECO | 瑞士国家经济事务委员会 |
| SFOE | 瑞士联邦能源办公室 |
| TDL | 输配电损耗 |
| TfL | 伦敦交通局 |
| TOD | 公共交通导向开发 |
| TTW | 油箱到车轮 |
| UITP | 国际公共交通联合会 |
| UNFCCC | 联合国气候变化框架公约 |
| WTW | 油井到车轮 |

1. 前言

1.1. 背景

交通部门是全球第二大能源消耗相关的 CO₂ 排放源，2012 年的排放量约为 100 亿吨当量二氧化碳，占全球石油消耗量的 1/2 和化石燃料温室气体排放量的 1/4；并且，在过去的二十年，交通相关的 CO₂ 排放的增长速度已经超过全球 CO₂ 的排放速度¹。2015 年，全球公共交通工具的温室气体排放量预计达到 7 亿吨。由于公交车辆保有量的不断增长，预计到 2030 年前公交领域温室气体排放量仍将会保持 50% 的增长趋势²。通过利用混合动力公交车替代传统化石燃料公交车将带来约 2 亿吨温室气体减排，这与荷兰一年的总温室气体排放量相当。如果采用电动公交车，则可以减少更多的温室气体排放³。

公交车保有量，尤其在发展中国家，增长迅速。预计到 2020 年，发展中国家的公交车保有量将占到 80%⁴。也就是说，发展中国家将成为公交车发展以及利用新技术减少温室气体排放的主要市场。本报告主要介绍了混合动力和电动公交车在发展中国家中的应用。

1.2. 目标

本报告以及“混合动力和纯电动公交车工具”的主要目标是开展混合动力公交车和纯电动公交车与传统化石燃料车的对比分析。本研究报告揭示了在发展中国家，混合动力和纯电动公交车实际工况的能耗、排放和经济性能。

混合动力和纯电动公交车的性能分析在很多报告都有所涉及。然而，这些信息大多是基于车辆制造厂商提供的数据，或者是基于短期的小批量应用的示范车型的测试数据。基于小样本的公交车测试数据的结论是不可靠并且没有说服力的。这是由于即使相同的车辆，其能耗也会受行驶状况、行驶路线特征、外部自然环境、驾驶者、车辆保养、车辆型号、是否使用空调、车辆轮胎等因素的影响而显著不同。只有通过同一城市既有传统公交车也有新能源公交车运行的大规模运营车辆，经过长期测试才能获得可靠的结果。在这种情况下，不同类型的车辆可以在基本相同的外部条件下进行比较。同样，在进行经济性分析的时候也需要基于大量车辆的运行数据。如果基于很小样本的可替代能源车辆运行数据，则会因为对于新能源车辆维修和驾驶缺乏经验，以及很少的零部件库存而导致结果存在偏差。

本报告的创新之处在于所有数据都是采集于大规模正常运行的可替代能源车辆。这些车辆与传统公交车在相同的外部条件下运行，这样就有较好的可比性。本报告的基础数据精度非常高，因为其中两个城市的数据在申请注册为联合国清洁机制发展项目时经过了第三方核查。本报告的核心部分聚焦于发展中国家的城市，这些国家的经验与发达国家会有所不同。报告的数据来自中国的深圳市和郑州市，以及哥伦比亚的波哥大市。同时通过文献查阅和访谈，本报告也涵盖了来自其他城市的信息，例如伦敦。本报告涵盖了世界范围内主要的混合动力和电动公交车的数据。

¹ ICCT, 全球交通能源和气候路线图, 2012

² 基于 ICCT 报告的车公里数据由 Grütter 咨询公司计算，全球交通能源和气候路线图，2012

³ 实际的减排量取决于电动公交车所在国家的电力构成情况

⁴ Frost & Sullivan, 全球混合动力和电动重型公交车市场战略分析报告，2013 年 8 月；交货期预测

本报告主要供公交运营企业的管理人员和为运营企业提供咨询服务的顾问人员参阅。本报告连同 excel 工具可以快速比较混合动力公交车和电动公交车与传统公交车的环境影响和运行经济性。

1.3. 内容

本报告包含以下主要章节:

- 第二章介绍了在本报告涉及的三个主要城市和基本情况, 包括波哥大、深圳和郑州;
- 第三章介绍了发动机/燃料技术以及公交车的未来市场发展情况;
- 第四章重点讨论了混合动力公交车的环境影响和经济性;
- 第五章重点讨论了电动公交车的环境影响和经济性;
- 第六章讨论了混合动力和电动公交车的气候融资机会。

1.4. Repic 机构和 Grütter 咨询公司

本报告由 Grütter 咨询公司撰写, Repic 机构和 Grütter 咨询公司提供研究资金支持。

Repic 是瑞士推动可再生能源和能源效率的跨部门的国际合作平台。Repic 由瑞士国家经济事务委员会 (SECO), 瑞士发展合作署 (SDC), 瑞士联邦环境署 (FOEN) 和瑞士联邦能源署 (SFOE) 共同发起设立。更多信息请参阅 www.repic.ch

Grütter 咨询公司成立于 1996 年, 主要致力于交通系统的碳金融方案。公司总部位于瑞士, 在亚洲和拉丁美洲有办公室或合作伙伴。公司已经完成了 200 多个物流和客运交通项目的碳金融方案, 并负责多个 BRT 系统和大规模运营车队温室气体排放的监测。更多信息请参阅 www.transport-ghg.com

作者感谢相关的公交公司和车辆制造厂商所提供的数据和信息。特别感谢波哥大 Transmilenio 系统公司的 Deysi Rodriguez, 深圳公交集团 Michael Kwei 和郑州 BRT 公司巴振东先生。

2. 比较城市

2.1. 介绍

本报告所涉及的三个城市的基础数据独一无二的, 是其他报告所不能获取的, 主要有三个核心原因:

- 混合动力和/或者电动公交车已经在该三个城市大规模运营。混合动力和/或者电动公交车已经在三个城市运行了数年, 因此环境数据和财务数据从统计学的角度讲非常可靠和稳定。而如果从试验车采集数据, 由于样本规模较小, 有可能个别样本的数据偏差对结果影响较大, 会影响整体结论的可信性。
- 所选择的三个城市都有大量的公交车辆在运营。这些运营的车辆不仅包括混合动力或者电动公交车, 还有很多的传统公交车。这样, 能够在相同的条件下对混合动力或者电动公交车与传统公交车辆进行比较。
- 三个城市都建立了很好的数据管理系统, 能够记录车辆运行的环境数据, 费用, 特别是燃料效率等。在郑州和波哥大市, 这些数据还经过了联合国指定的第三方机构进行

核查，因为他们都是清洁发展机制框架下注册的交通项目。燃料效率数据是按照每个车辆的月度数据进行统计。较好的数据精度确保了分析结论的可靠性。

本报告的特别之处就在于可以在相同的外部自然条件和运营状况下，对混合动力和电动公交车与传统公交车进行比较。

本报告涉及的三个城市包括波哥大、深圳和郑州。

2.2. 城市概述

波哥大是哥伦比亚的首都和最大城市。城区约有 900 万居民，海拔 2625 米。

图 1: 波哥大地理位置和 TransMilenio BRT 系统



图: Grütter

TransMilenio S.A. 是波哥大市政府所有的公司，负责协调波哥大市 BRT 系统所有车辆运营商。波哥大 TransMilenio BRT 系统是世界范围内第一个注册成为交通清洁发展机制项目。自 2006 年起，Grütter 咨询协助进行该 BRT 系统温室气体排放的监测和核算。

深圳是位于中国广东省南部的的主要城市，毗邻香港北侧。市区人口约 1300 万人。

目前深圳市的公共交通系统主要由三个大的公交企业运营，分别是深圳公交集团，城市西部公交公司和城市东部公交公司。

图 2: 深圳地理位置和深圳公交集团



图: Grütter

混合动力和纯电动公交车

郑州是河南省的省会和最大的城市，位于中国华北地区。城区人口约 400 万。

图 3: 郑州地理位置和 BRT 系统



图: Grütter

郑州公共交通总公司隶属于郑州市政府，下辖多个公交运营企业。郑州 BRT 是联合国注册的清洁机制发展项目。Grütter 咨询公司自 2010 年起协助监测和核查郑州 BRT 系统车辆的温室气体排放。

下表列出了三个城市公共交通系统和车辆的主要指标。

表 1: 公交系统主要指标

| | 波哥大 ⁵ | 深圳 | 郑州 |
|--------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 日客运量 | 230 万 | > 600 万 | 320 万 |
| 公交车辆数 | 4,500 | > 10,000 | > 5,000 |
| 主要公交车类型 | 50% 中型公交 20% 标准车 25% 铰接车 3% 双铰接车 | 以标准公交车为主；部分中型和双层公交 | 7% 中型公交 67% 标准车 26% 铰接 |
| 传统公交车的燃油类型 | 100% 柴油 | CNG 和柴油 | 大约 50% CNG 和 50% 柴油；部分无轨电车 |
| 排放标准 | 55% 欧 II 20% 欧 III 3% 欧 IV 22% 欧 V | 欧 III, IV, V 和 零排放 (电动公交) | 欧 III, IV, V 和 零排放 (电动公交) |
| 车辆主要生产厂商 | 雪弗莱, MB 和沃尔沃 ⁶ | 比亚迪, 奔驰, 五洲龙 | 宇通 |
| 截至 2014 年中的可替代能源车辆 | 200 辆柴油混合动力(12 米, 无插电式混合) | 1,800 辆插电式混合动力(12 米) 1,300 辆纯电动公交(12 米) | 600 辆柴油混合动力 2,000 辆 CNG 混合动力 200 辆 LNG 混合动力 约 1,300 辆 插电式燃气混合动力 12 米, 14 米和 18 米 110 辆纯电动公交车(12 米) |

中型公交车：8-11 米；载客 30-60 人

标准公交车：12-14 米；载客 60-100 人

铰接公交车：16-18 米；载客 140-180 人

⁵ 仅包括 BRT 系统及其运营企业

⁶ 总计占车队总数的 80%

双铰接公交车：24 米, 载客 240-280 人

3. 公交车的发动机/燃料技术

3.1. 前言

本报告主要对混合动力和电动公交车与传统柴油公交车、CNG 和 LNG 公交车的实际运行效果进行比较⁷。混合动力包括串联式、并联式和插电式混合动力车，但是不包括没有独立的电力传动系统所谓的“中度混合动力”车。本报告也不包括无轨电车，因为这一技术已经在多个城市运行了数十年。本报告也不涉及快速充电电动汽车，因为他正处于试验阶段。本报告也不涉及氢燃料电池汽车，因为这类车辆也处于试验阶段，尚没有大规模投入运营。

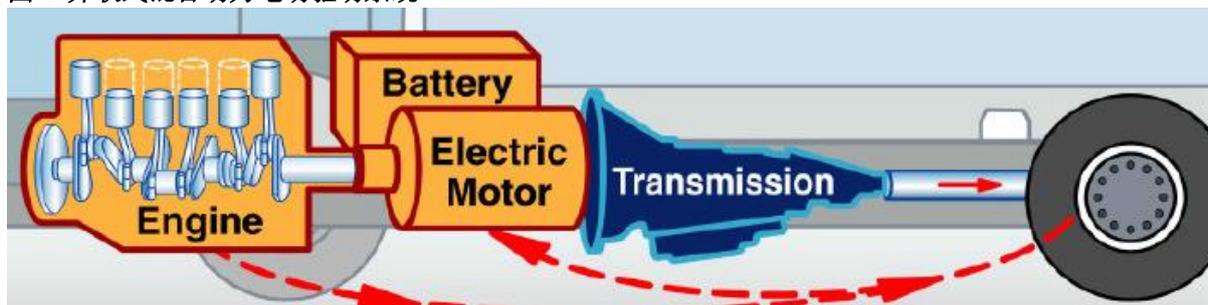
本报告重点探讨公交车辆技术，而不涉及车辆所使用的燃料技术。因此，没有涉及气体燃料或生物燃料优缺点方面的讨论。

本研究的主要车型是平均载客容量 80 人（含站立），12 米长的标准公交车⁸。该车型是目前世界范围内主要采用的车辆类型。当然，本报告也涉及大容量公交车（18 米长铰接车）的相关信息。

3.2. 混合动力公交车

混合动力类型包括串联式、并联式和混联式混合动力。混联式混合动力结合了串联和并联模式驱动系统。除此之外，混合动力公交车还划分“传统”混合动力公交车和插电式混合动力。后者允许使用外接电源为车辆充电。

图 4: 并联式混合动力电动驱动系统



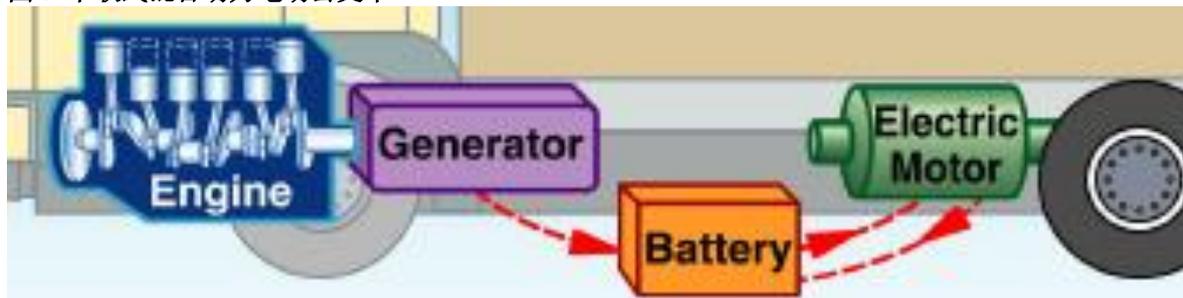
来源：西南研究院

并联式混合动力发动机可以驱动车轴，电机可以对车载电池进行充电或直接驱动车轴。内燃机和电动机各自连接到车辆传动系统。在走走停停的交通状况下电机提供驱动力，而在高速公路上行驶时完全由内燃机提供驱动力。此外，通过再生制动过程，刹车制动损失的能量被回收用于电池充电。

⁷ LPG 公交车没有包含在内

⁸ 公交车指在城市范围内运送乘客的车；城间的旅客运输主要由长途客运汽车承担

图 5: 串联式混合动力电动公交车



来源：西南研究院

串联式混合动力车，内燃机（ICE）和驱动车轴之间没有机械连接。发动机驱动发电机对电池充电。电池带动电机驱动车轮前进。由于内燃机没有直接和车轮连接，他可以在理想的状态下运行，甚至可以关闭一段时间而完全由电驱动公交车辆行驶。

柴油-电力混合动力车辆在 15 年前已经商业化生产。很多厂商也都开发了新的型号。CNG 和 LNG 混合动力车与柴油-电力混合动力车类似，主要在中国应用较多。

插电式混合动力车，是由一个可从外部电源充电电池供电。插电式混合动力车有车载发动机，也可以对车载电池进行充电。这样的设计可以使车辆在部分时间完全由电驱动。插电式混合动力车的纯电续航里程主要取决于行驶路线的特性，充电频率以及车辆和能源系统的配置。插电式混合动力车是一个相对较新的技术。但是像郑州和深圳在两年前已经大量的使用插电式混合动力车。

传统混合动力车使用超级电容蓄能，而插电式混合动力车采用电池蓄能⁹。

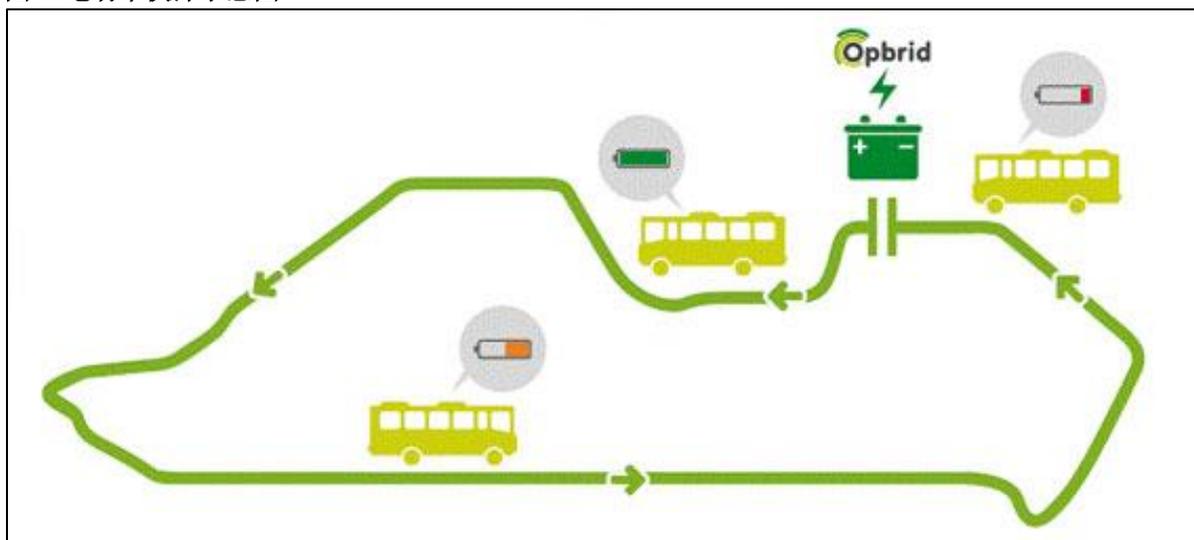
3.3. 电动公交车

本报告涉及的电动公交车是指仅由可充电电池驱动的电驱动车辆。纯电动公交车一般载有大量的电池以确保一定的行驶里程，但这也导致车辆要承载额外的重量并占用车内空间。为了平衡车载电池的数量和车辆续航里程，一些车辆厂商提出了采用快速更换电池的办法为车辆充电。

快速电动公交车可以在公交线路沿线的充电点充电，或者在首末站充电点充电（如下图所示）。日内瓦正在测试一种超快速的闪充充电系统为较接公交车充电（如下图）。虽然这种充电方式看上去很有前途，但目前还处于试验阶段，并没有大规模应用，因此本报告并没有涵盖这种充电方式和车型。

⁹ 电容即能量储存装置，类似电池。传统的电容是电子装置，可以很快地充放电。而电池依赖化学过程，相对较慢。电池有较高的能量密度，而电动有较高的功率密度。

图 6: 电动车快充示意图



来源: <http://hybricon.se/word/projects/service-modules/>; 13 公里的公交线路需要在同一个地点 3 分钟快充即可完成。

图 1: 快速充电公交车 (TOSA¹⁰)



图: Grütter

国际公共交通协会正在协调由 40 个合作伙伴组成的联合体实施一个称为 ZeEUS（零排放城市公交系统）的为期 4 年的示范项目，旨在推动纯电动公交车在更多的城市应用。这个项目于 2014 年 1 月正式启动，共计 35 辆 12 米长电动公交车在 8 个欧洲城市测试不同的动力系统配置的运营情况（包括纯电动公交、插电式混合动力以及车载电池的无轨电车系统）。

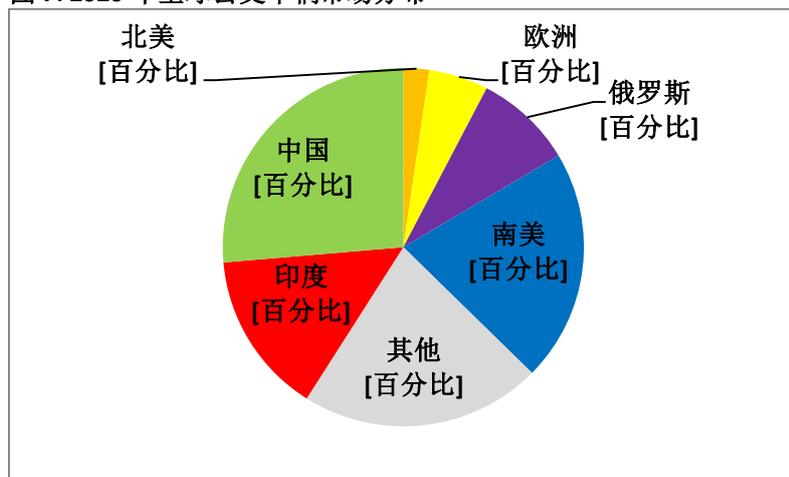
3.4. 混合动力和电动公交车的市场渗透率

2010 年，全球约有 1600 万辆公交车，预计到 2020 年和 2030 年会增长到 1800 万辆和 2000 万辆。2010 年，全球有 17% 的公交车在中国，12% 的公交车在韩国，美国和俄罗斯各占 6%，印度占 4%。预计到 2030 年，中国、印度和韩国将会成为公交车保有量最大的三个国家¹¹。国际清洁交通委员会提供的车辆保有量数据不仅包括城市公交车，还包括城际间交通及其他模式的公交车辆。本报告主要讨论城市公交车的情况。预计到 2020 年，会有 30 万辆新的公交巴士交付使用。下图展示了哪些国家和地区将是主要的买家。

¹⁰ 无轨电车能源优化补给方式

¹¹ ICCT, 全球交通能源和气候路线图, 2012, 附录 E

图 7: 2020 年全球公交车辆市场分布



来源: Source: Frost & Sullivan, Strategic Analysis of Global Hybrid and Electric Heavy-Duty Transit Bus Market, 08/2013; unit shipment forecast

中国将会采购 7 万辆公交车，占全球 25% 的份额。据预测，北美地区仅购买约 6000 辆。印度和俄罗斯也将会是主要的市场。欧洲和北美地区约占 8% 的份额，对其他国家而言也是增长率最低的区域。这表明，在未来欧洲和美国的公交车市场地位将会进一步下降。数据也表明，纯电动和混合动力公交车的示范运行主要集中在中国、印度、南美地区、东南亚国家以及非洲国家等公交车增长率最高的国家。预计中国的公交车辆生产厂商，如宇通、五洲龙、福田、金龙和比亚迪等将会领先全球的混合动力和电动公交车市场，而沃尔沃、ADL，戴姆勒等将会是除中国外区域的主要供应商¹²。

目前，全球有约 250 个在运营和规划的 BRT 项目。这为混合动力和电动公交车的应用创造了主要市场。基于这样的考虑，Frost & Sullivan 预计到 2020 年，混合动力和电动公交车约占 15% 的新出厂公交车。以 2012 年为基数，其综合年增长率达到 20%。这一增长率远高于公交车辆年 6% 的增长。预计 2020 年混合动力和电动公交车的销量将达到 27000 辆，而 2012 年仅为 8000 辆。

下表给出了 12 米柴油公交车、混合动力公交车和电动公交车在世界主要国家和地区的售价。

¹² Frost & Sullivan, 全球混合动力和电动重型公交车市场战略分析报告, 2013 年 8 月

表 2: 不同地区公交车价格 (美元)

| 市场 | 传统柴油车 | 混合动力 | 电动 | 混合动力公交车溢价 | 电动公交车溢价 |
|--------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|-------------|
| 中国 | \$60,000-\$90,000 | \$125,000-\$200,000 | \$280,000-\$350,000 | 115% | 420% |
| 印度 | \$75,000-\$110,000 | \$175,000-\$255,000 | \$325,000-\$410,000 | 130% | 300% |
| 俄罗斯 | \$130,000-\$180,000 | \$245,000-\$325,000 | \$400,000-\$500,000 | 85% | 190% |
| 拉美 | \$200,000-\$225,000 | \$280,000-\$340,000 | \$410,000-\$500,000 | 45% | 115% |
| 世界其他地区 | \$100,000-\$350,000 | \$195,000-\$500,000 | \$300,000-\$700,000 | 55% | 120% |
| 欧洲 | \$250,000-\$350,000 | \$420,000-\$510,000 | \$575,000-\$680,000 | 55% | 110% |
| 北美 | \$300,000-\$400,000 | \$485,000-\$540,000 | \$595,000-\$690,000 | 45% | 85% |
| 平均 | \$200,000 | \$330,000 | \$480,000 | 65% | 140% |

来源: Frost & Sullivan, 全球混合动力和电动重型公交车市场战略分析报告, 2013 年 8 月; 基于区域市场价格, 以 2012 年美元计

以下两点值得关注:

- 公交车的价格在各地区差异较大;
- 电动公交车在中国的价格相当于传统柴油公交车在北美和欧洲的价格。

混合动力公交车和电动公交车的溢价率在中国、印度和俄罗斯等价格较低的国家较欧洲和北美等价格较高的国家要高很多。平均而言, 混合动力公交车的价格约为\$100,000-\$150,000 美元, 电动公交车的价格约为\$250,000 - \$300,000 美元。自 2012 年, 混合动力公交车和电动公交车较传统公交车的价格差在逐步缩小, 报告的后续部分也会给出具体原因。

4. 混合动力公交车运行评估

4.1. 介绍

对混合动力公交车与传统公交车进行比较时, 遵循以下原则:

- 基于同一城市开展车型比较, 例如同在波哥大市比较可替代能源公交车与传统公交车的性能;
- 传统公交车和可替代能源公交车在相同的路线运行, 或者在相同类型的路线上运行;
- 相同车型或载客量的公交车辆进行比较;
- 进行比较的公交车辆具有相同的排放标准和车龄;
- 在相同的时段内进行比较。

郑州和波哥大市每辆公交车的燃油消耗量是通过 RFID 技术, 或者通过加油站的车辆加油记录信息获得。车辆的行驶里程通过 GPS 设备记录。车辆的燃料消耗量和行驶里程通过第三方机构控制和审核。

波哥大市最近采购了 500 辆混合动力公交车, 其中的 200 辆自 2014 年 10 月开始运行。波哥大同时也有大量相同型号的先进柴油公交车在运行。波哥大混合动力公交车采用沃尔沃传统的 12 米长, 载客量 80 人的车型。传统公交车和混合动力公交车都没有安装空调系统。

图 2: 波哥大市混合动力公交车

混合动力和纯电动公交车



图: Grütter

郑州自 2010 年底开始运行混合动力公交车，总计有 2800 辆。下表给出了在运行的混合动力公交车的主要信息。

表 3: 郑州混合动力公交车

| 指标 | 柴油混合动力公交车 | CNG/LNG 混合动力公交车 |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 在运营的混合动力公交车辆数 | 2009: 20 辆 2010: 20 辆 2011: 460 辆 2012: 590 辆 2013/14: 600 辆 | 2012: 960 辆 2013/2014: 2,220 辆 其中 200 辆 LNG |
| 插电式混合动力(含上述列的车辆数目) | 0 辆 | 1,300 辆(所有都是 2013 年后采购的新车) |
| 车型和载客量 | 80 人 12 米公交车 110 人 14 米公交车 150 人 18 米公交车 | 80 人 12 米公交车 110 人 14 米公交车 130 人 18 米公交车 |
| 制造厂商 | 宇通 | 宇通 |
| 排放标准 | 欧 IV 和 V | 欧 V |

来源: 郑州公共交通总公司, 2014

图 3: 郑州 12 米和 14 米混合动力公交车



图: Grütter

图 4: 郑州 18 米插电式 LNG 混合动力和 12 米 CNG 混合动力



图: Grütter

图 5: 插电式混合动力充电系统 (电池, 充电装置)



图: Grütter

郑州在运行的混合动力公交车约有 2800 辆，占总车辆数的 50%多。所有的混合动力公交车都配有空调系统，均为并联式混合动力车辆。其中，有 50% 车辆为插电式混合动力。插电式混合动力公交车的电力蓄能够行驶约 30 公里，充电时间为 40 分钟。这部分车辆安装的是锂电池，而传统混合动力车辆用的是超级电容电池。

4.2. 混合动力公交车的环境评价

4.2.1. 文献总结

世界上很多公交运营企业已开展了很多混合动力公交车的示范运营。目前混合动力公交车的燃料节约效率和经济成本数据都是基于这些示范运营所得到的。有些示范运营仅持续了很短的时间，或者车辆数量非常少，且没有在与传统公交车类似的运营线路上进行比较。下表总结了混合动力公交车一些研究的主要结论。除了 C40 的研究外，其他研究的车辆规模都比较大（超过 50 辆公交车，虽然在德国的示范车辆分布在不同的城市）且运行的时间较长。

混合动力和纯电动公交车

表 4: 最近关于混合动力公交车燃料节约率的研究结论

| 国家 | 节油率 | 备注 | 研究者 |
|-------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 德国多个城市 | 节省燃料 10-20% | 与柴油公交车进行比较；基于 60 辆混合动力公交车，且大多为铰接车 ¹³ 。结论的可比性较差因为这些车辆在不同的城市运行，且没有与传统公交车在相同线路上运行 | PE International, Abschlussbericht Plattform Innovative Antriebe Bus, realized for BMVBS, 2011 |
| 英国伦敦 | 节省燃料 35-45% ¹⁴ | TfL (伦敦交通局) 运营着 650 辆混合动力公交车，计划到 2016 年增加到 1700 辆（占车辆总数的 20%），基本都是双层公交车。 | TfL, 2013 and 2014 and EU Clean Fleets Program (www.clean-fleets.eu) |
| 拉丁美洲（3 个城市） | 节省燃料 15-35% | 12 米公交车；基于车辆在圣保罗，里约热内卢，圣地亚哥，智利等地方 2 天的运营数据，结论有待商榷。 | C40Cities, Low Carbon Technologies Can Transform Latin America's Bus Fleets, 2013 |
| 美国纽约 | 节省燃料 20-30% | 纽约拥有世界上最多的在运营的混合动力公交车，约有 1700 辆。目前正在将部分混合动力公交车替换为柴油公交车，因此总数有可能减少到 1300 辆，占总公交车辆数的 30%。混合动力公交车车龄较长（该项目 15 年前启动）。与传统公交车相比，混合动力公交车的空调制冷对燃油经济性的影响更大，因而降低了燃油节约率。 | NREL, Performance Comparison of Hybrid Electric, CNG, and Diesel Buses and New York City Transit, 2008 |

德国的研究结论有些有益的借鉴 – 但是由于车辆分布在不同的城市，且在不同的交通状况下运行，因此就燃油经济性和车辆运行稳定性等方面很难得出非常令人信服的结论。柴油公交车和混合动力公交车的运行状况并不完全相同，且可供分析的样本量较小导致统计意义上得出的结论难以有说服力。

C40 的研究基于非常小的样本量（少于 10 辆车分布在 4 个城市），在每一个城市仅运行了几天的时间。研究的结论更多的是象征意义，从单个车辆的运行状况计算的车辆燃料节约率和运行可靠性等并不能够得出有代表性的结论。单个样本的偏差会影响总体的评估结论。

伦敦和纽约的结论相对可信，因为他们的研究是基于大规模的混合动力公交车运营数据，且混合动力公交车与传统柴油公交车在相同或相似的路线上运行了相当长一段时间。

虽然纽约混合动力公交车运行的时间最长，但是对于今天而言，纽约的数据并没有太多的参考意义，因为纽约的混合动力公交车技术相对陈旧，已经过时了。在最近的 3 年，纽约没有新采购混合动力公交车。

伦敦在运营的混合动力公交车约有 600 辆，第一辆车是在 2006 年开始运行。计划到 2016 年达到 1700 辆混合动力公交车运营规模，占总公交车辆数的 20%。伦敦也有大量的先进的柴油公交车在相同的路况下运行，这样使混合动力公交车和传统柴油公交车有可比性。截至 2013 年末，伦敦有 9000 辆公交车在运营，其中 40% 为有 DPF 装置的欧 3 车辆，20% 为欧 4 车辆，30% 为欧 5 车辆，10% 为超环境友好型车辆（EEV）。大约 30% 的车辆为单层公交车，70% 为双层公交车。有两种类型的混合动力公交车在运行：传统混合动力公交车和由 Wrightbus 公司生产的专为伦敦设计的伦敦新巴士

¹³ 铰接公交车的燃料节约效率相对低，因为混合动力铰接公交车相对较新，车辆保有量少。

¹⁴ 传统混合动力公交车占比最低，新伦敦巴士比例较高。该比较基于欧 V 排放混合动力和柴油车

图 6: 伦敦新巴士



图: Grütter

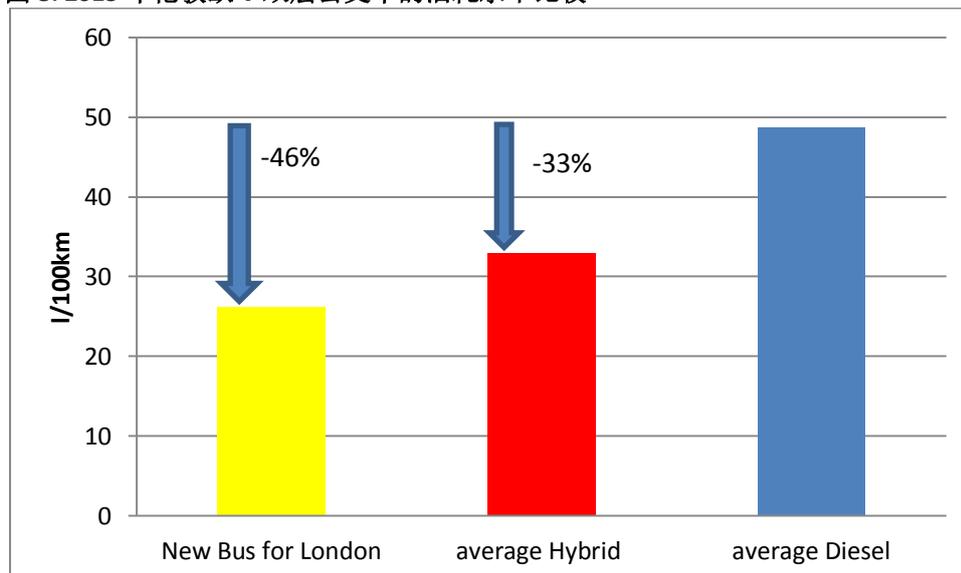
下表和图给出了伦敦的柴油公交车、传统混合动力公交车和伦敦新巴士的油耗指标。

表 5: 2013 年伦敦公交车的油耗 (所有公交车为双层欧 V)

| 公交车类型 | 百公里油耗 (升/100 公里) | 较传统柴油车节油率 |
|-----------|---------------------|-----------|
| 传统柴油车 | 49 | |
| 传统混合动力车 | 33 | 33% |
| 伦敦混合动力新巴士 | 26 | 46% |

来源: TFI 2014。传统混合动力车指除伦敦混合动力新巴士之外的混合动力公交车

图 8: 2013 年伦敦欧 V 双层公交车的油耗水平比较



来源: TFI 2014。传统混合动力车指除伦敦混合动力新巴士之外的混合动力公交车

4.2.2. 波哥大混合动力公交车的环境评价

燃油经济性

混合动力和纯电动公交车

燃油经济性分析比较了同一企业运营的 12 米长欧 V 柴油混合动力公交车与 12 米长欧 V 柴油公交车在同一时段的能耗水平。波哥大公交车（传统公交车和混合动力公交车）都没有安装空调系统，在全年燃油消耗值相差不大。虽然 TransMilenio 公交系统不同的企业都在基本相同的条件下运营，但运营企业间车辆平均燃料消耗量有一定的差异。因此本研究采用了同一公交运营企业的传统公交和混合动力公交车进行比较。下表给出了传统欧 V 公交车和混合动力欧 V 公交车的燃料消耗强度指标。

表 6:波哥大 12 米欧 V 混合动力和传统公交车油耗指标

| 运营企业 | 柴油公交车油耗 | 混合动力公交车油耗 | 混合动力公交车节油率 |
|------|-------------|-------------|------------|
| A | 39 升/100 公里 | 30 升/100 公里 | 25% |
| B | 44 升/100 公里 | 33 升/100 公里 | 25% |

来源：数据来自 TransMilenio（记录了每辆公交车每天的数据）。Grütter 咨询公司对数据进行了审核、控制和分析

由上表可以看出，两家运营企业燃料消耗强度相差 10%左右，柴油公交车和混合动力公交车存在同样的差异。因此两家企业混合动力公交车节油率都是 25%。

温室气体排放

本研究采用了 IPCC 推荐的核算方法和标准排放因子计算温室气体排放量，即温室气体排放量等于燃料消耗量乘以燃料净热值（NCV）乘以燃料对应的 CO₂ 排放因子。下表给出了主要的参数及其值。

表 7: 计算温室气体排放的主要参数值

| 参数 | 值 | 来源 |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 柴油净热值 | 43 MJ/kg | IPCC Guidelines for National GHG Inventories, 2006, table 1.2, average |
| 柴油 CO ₂ 排放因子值 | 74.1 gCO ₂ /MJ | IPCC Guidelines for National GHG Inventories, 2006, table 1.4, average |
| 柴油密度 | 0.844 kg/l | IEA, Energy Statistics Manual, 2005 |
| 油井到油箱柴油排放因子 | 22% | JRC-Study study 22%, CEC 23%, GREET model 25%, GHGenius model 29%; lower end value was taken to be conservative ¹⁵ |

下表给出了混合动力公交车和化石燃料公交车油箱到车轮(TTW)和油井到车轮(WTW)的温室气体排放强度。油箱到车轮(TTW)的排放是车辆运行过程中燃料燃烧后的直接排放。油井到车轮(WTW)排放包括上游的排放（石油开采，冶炼，运输）。油井到车轮(WTW)包括直接排放和上游的间接排放，能够很好的说明整个生命周期燃料的排放强度，易于不同技术间温室气体排放的比较。

表 8: 波哥大 12 米欧 V 标准公交车温室气体排放强度 gCO₂/km

| 运营企业 | 柴油 | | 混合动力 | | 温室气体减排比例 |
|------|-----|-----|------|-----|----------|
| | TTW | WTT | TTW | WTW | |

¹⁵ JRC - EUCAR-CONCAWE 合作联合研究中心，基于欧洲 3C 版本的未来车用燃料和发动机的油井到车轮的排放分析；美国加州能源委员会，油井至车轮全生命周期的能源消耗，排放和水影响分析，2007；LLC，石油燃料直接和间接温室气体排放评估，2009；Nylund et.al, 公交车的燃料和技术替代路线分析，VTT 技术 46，2012；GHGenius 模型 4.02，由加拿大自然资源委员会开发，2013；<http://www.ghgenius.ca/>；GREET 模型由美国能源部开发 <http://greet.es.anl.gov/>

混合动力和纯电动公交车

| | | | | | |
|---|-------|-------|-----|-------|-----|
| A | 1,060 | 1,290 | 800 | 970 | 25% |
| B | 1,200 | 1,460 | 890 | 1,090 | 25% |

来源：Grütter 咨询公司根据表 6 和表 7 计算得来

温室气体的减排率与燃料节约率相近，对混合动力公交车而言为 25%。

在波哥大，12 米标准公交车的年均行驶里程约为 65000 公里。每辆混合动力公交车每年减少的 CO₂ 排放大约为 22 吨。以 500 辆车计算，年减排量超过 10,000 吨。

当地环境影响

NO_x 和颗粒物 (PM) 用来评估混合动力公交车对当地空气质量的影响。污染物的排放主要取决于车辆的排放标准。欧洲排放标准是采用克每千瓦时来衡量。基于 1 升柴油等于 10 千瓦时，则污染物的减排量和节油率差不多¹⁶。

4.2.3. 郑州混合动力公交车的环境评价

燃油经济性

相同车型的混合动力柴油公交车和传统柴油公交车，以及相同车型的 CNG 混合动力公交车和 CNG 公交车的燃油数据用来比较不同类型车辆的燃油经济性。收集的数据包括 2013 年全年每月每辆公交车的燃料消耗量和行驶距离。下表给出了郑州不同类型混合动力公交车和传统公交车的燃油经济性数据

Table 9: 郑州混合动力和传统公交车的燃油经济性比较 (2013 年平均值)

| 车辆类型 | 燃油经济性 升/100 公里 or 立方米/100 公里 | 与传统公交车相比 节约 |
|-------------------------------------|------------------------------|-------------|
| 标准(12 米) 柴油混合动力 | 29.5 | 26% |
| 标准 (12 米) 传统柴油车 | 40.0 | |
| 铰接 (18 米) 柴油混合动力 ¹⁷ | 43.9 | 34% |
| 铰接 (18 米) 传统柴油车 ¹⁸ | 66.5 | |
| 标准 (12-14 米) CNG 混合动力 | 39.0 | 19% |
| 标准 (10-11 米) CNG 传统车辆 ¹⁹ | 47.9 | |

来源：郑州公交公司，2014；Grütter 咨询公司对每辆公交车每月的燃油消耗数据进行收集和计算；

总体而言，混合动力公交车较传统公交车节约 20-35%左右的燃料。CNG 混合动力公交车较传统公交车的能源节约效率会高于这一数值，因为 CNG 混合动力公交车的车长介于 11.7 米至 13.7 米，载客能力为 86-112 人，而传统 CNG 公交车长 10.2-10.6 米，载客能力大约为 60 人。如果按照载客能力折算，CNG 混合动力公交车较传统公交车高约 40%，CNG 混合动力公交车的燃油效率要明显高于传统 CNG 车辆。而且，在郑州传统 CNG 车辆没有配备空调系统，而 CNG 混合动力公交车都装有空调。从郑州实际运营数据来看，混合动力公交车较传统公交车节油 20-30%是没有问题的。

¹⁶ 参阅 VBZ, Elektrobusse bei den Verkehrsbetrieben Zürich or A.M. Hallquist et.al., 柴油和 CNG 公交车颗粒物和气体排放, Atmos. Chem. Phys., 13, 5337-5350, 2013 or R. Pütz, Quo vadis Linienbusbetrieb?, VDV Jahrestagung 2014, 05/2014

¹⁷ 在 BRT 主干线路

¹⁸ 在 BRT 主干线路

¹⁹ 大型 CNG 混合动力公交车的燃料消耗进行了调整

所有的公交车在夏天最热几个月的燃料消耗量明显偏高。下图比较了郑州全年的月平均气温，以及每月平均的燃料消耗强度，明显可以看出两者的相关性。

图 9: 2013 年郑州月平均气温 (摄氏度)

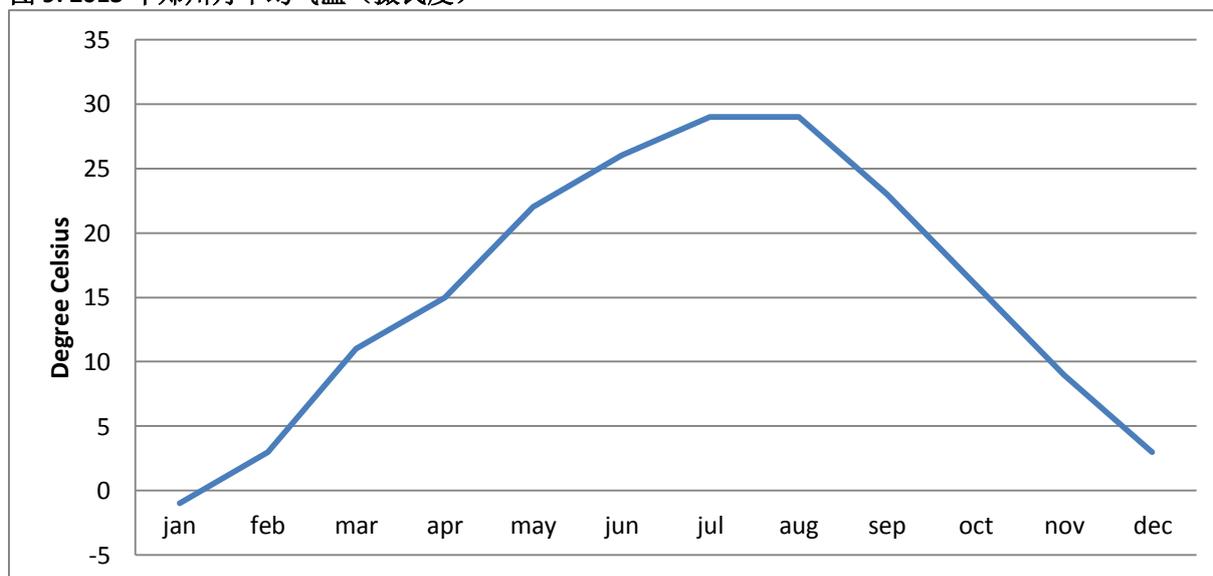
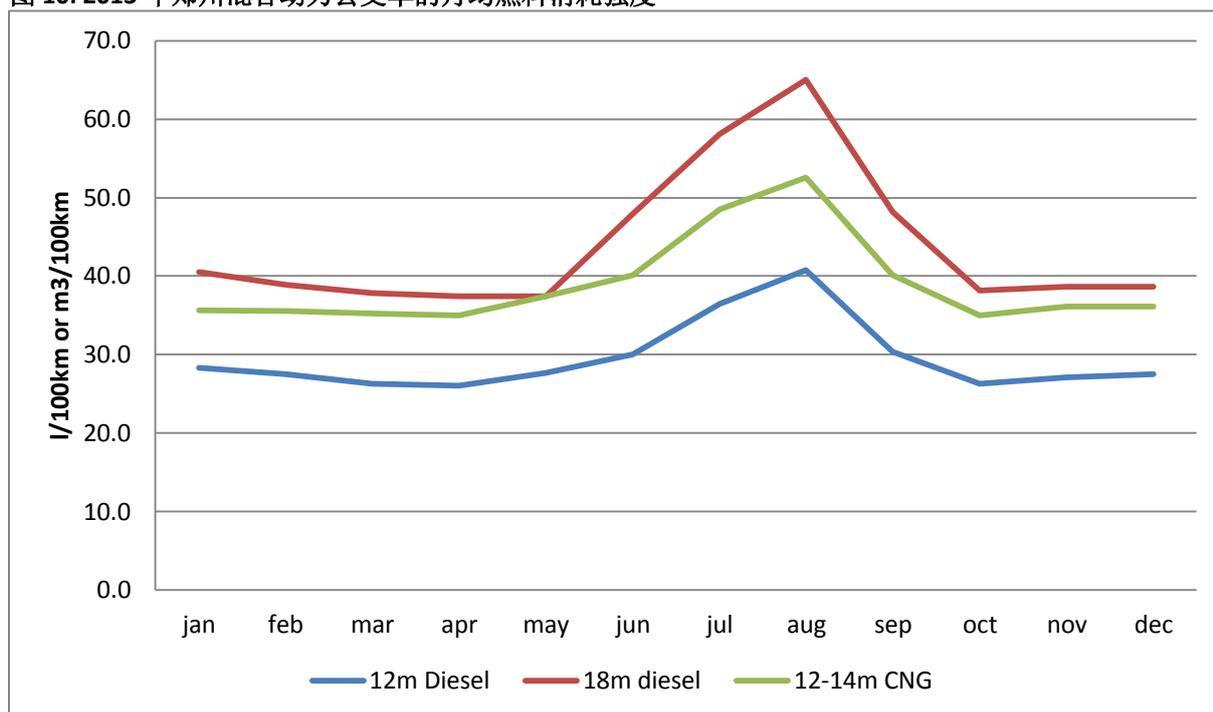


图 10: 2013 年郑州混合动力公交车的月均燃料消耗强度

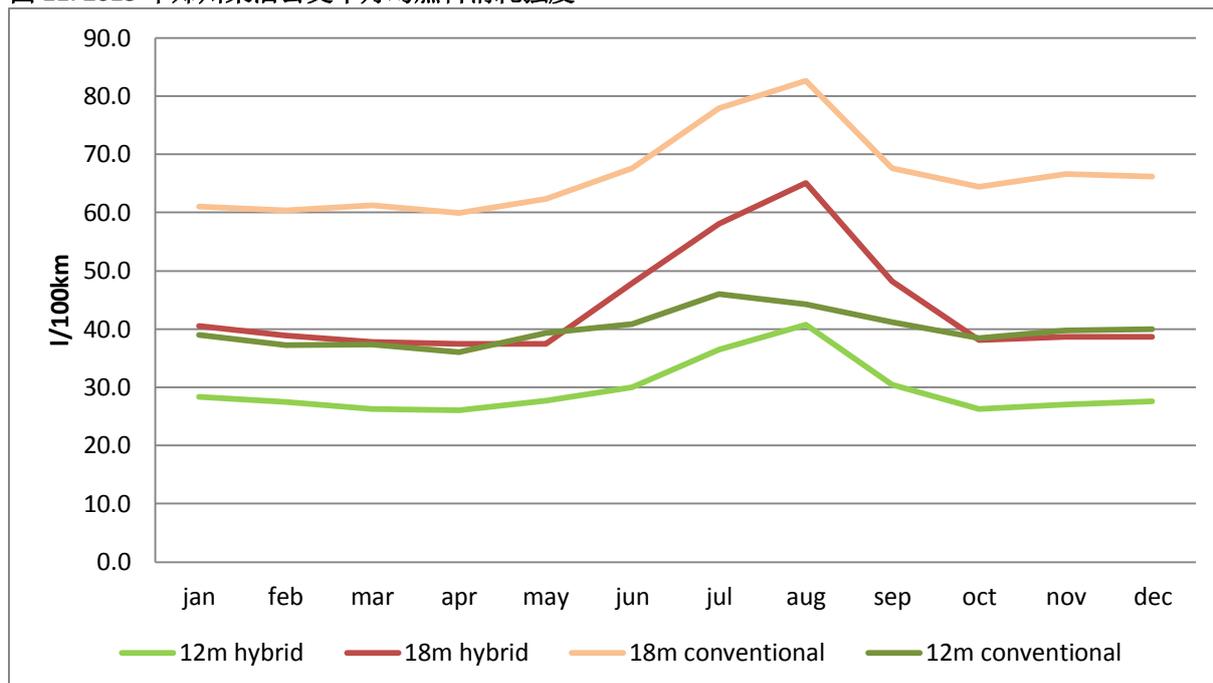


来源：郑州公交总公司，2014；由 Grütter 咨询公司计算整理

从上图可以看出，在 8 月混合动力公交车的燃料消耗强度要较年平均高出 35-50%。传统公交车²⁰在夏天的燃料消耗强度要较年平均高出 20%左右。由此可以看出，在夏天混合动力公交车在开空调的情况下比传统公交车的燃料节约效率更加明显。下图展示了郑州柴油公交车的月均燃料消耗强度。

²⁰ 在郑州，传统 CNG 公交车没有空调

图 11: 2013 年郑州柴油公交车月均燃料消耗强度



来源: 郑州公交总公司, 2014; 由 Grütter 咨询公司计算整理

总体而言, 在最热的七八月份, 柴油混合动力公交车较传统柴油公交车节约燃料约 25-30%, 七月和八月的差异约在 10-25%。在冬季十二月和一月, 外部气温接近零度, 车内开启暖气, 但是目前没有暖气对燃油消耗的统计数据。综上, 可以得出两个结论:

- 在夏季气温较高的国家, 需要大量使用空调, 混合动力公交车的燃料节约效率较在气温适中或者凉爽夏天的国家低;
- 在夏季气温较高的国家, 公交车辆安装双层玻璃非常重要, 尤其对于混合动力公交车而言。

插电式混合动力公交车自 2014 年开始在郑州运行, 如果对车辆每天充电, 则可以进一步节约 10-15% 的燃料, 这样较传统柴油公交车燃料节约率在 30-45% 左右。

温室气体排放

与波哥大采用的方法相同. 下表列出了主要参数值²¹.

表 10: 确定温室气体排放因子的主要参数值

| 指标 | 值 | 源 |
|--------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| CNG 卡路里净值 | 48 MJ/kg | IPCC 国家温室气体排放清单指南, 2006; 表 1.2 平均 |
| CNG CO ₂ 排放因子 | 56.1 gCO ₂ /MJ | IPCC 国家温室气体排放清单指南, 2006; 表 1.4 平均 |
| CNG 公交车 CH ₄ 排放因子 ²² | 25 gCO _{2e} /km | IPCC 国家温室气体排放清单指南, 2006; 表 3.2.5 |

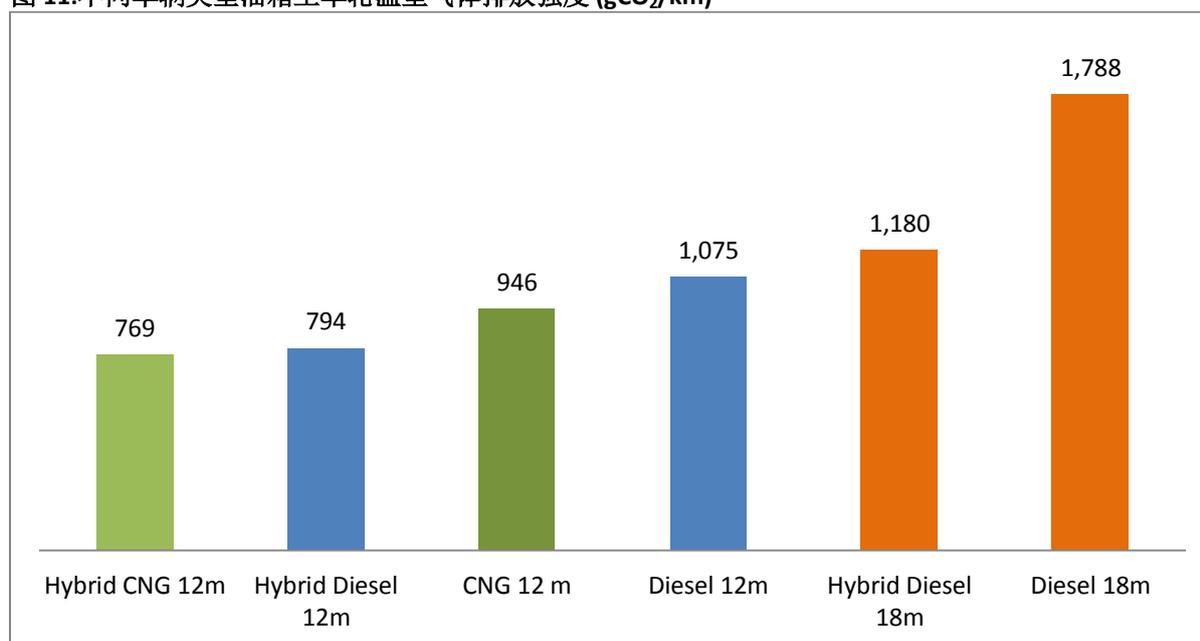
²¹ 指标已经包括在表 7 中, 在此不重复

混合动力和纯电动公交车

| | | |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | 基于欧洲 COPERT IV 模型 对欧 IV 及以后车辆 CH ₄ 排放系数计算，2013 ²³ |
| CNG 密度 | 0.714 kg/m ³ | 基于摩尔质量 |
| CNG 油井至油箱排放因子 | 11% | IPCC 1996，世界其他地区 11% ²⁴ 。CEC 17-37%取决于管道长度，GHG enius model 18%，JEC-Study 15-40%取决于管道长度；GREET model 45% ²⁵ |
| 电力 CO ₂ 排放因子 | 0.72 kgCO ₂ /kWh | 中国国家发改委中部区域电力排放因子，2013 |

下图展示了混合动力公交车和传统化石燃料公交车油箱至车轮的温室气体排放强度，也即化石燃料经发动机燃烧过程中的排放强度。

图 11:不同车辆类型油箱至车轮温室气体排放强度 (gCO₂/km)



来源：Grütter 咨询公司基于郑州公交总公司提供的数据计算

下表列出了油井到油箱的排放，也即化石燃料的上游排放。该表也包括了自 2014 年初在郑州开始运行的 CNG 插电式混合动力车辆。

²² 柴油公交车 CH₄ 排放因子是边界量，因此没有包含；柴油和 CNG 公交车 N₂O 排放因子也没有包含

²³ 基于 2013 年 IPCC AR5 714 页，900 毫克 CH₄/公里可以带来 28 倍的全球变暖影响（GWP）

²⁴ 296 吨 CH₄/PJ 表 1-63 和 1-64；燃油消耗的二氧化碳排放因子是根据 IPCC 56.1 克/兆焦；根据联合国气候变化框架公约，CH₄ 对气候变暖的影响是 21 倍

²⁵ 基年的排放量较项目实际排放有所低估，因为在基年化石燃料的消耗量要比项目实际多

表 11: 公交车辆油箱之油箱的排放强度

| 车辆类型和技术 | CO ₂ 排放强度 g/km | 与传统车相比，温室气体减排比例 |
|----------------------|---------------------------|-----------------|
| 12 米传统柴油车 | 1,310 | |
| 12 米混合动力柴油车 (非插电式) | 970 | 26% |
| 12 米传统 CNG 车辆 | 1,050 | |
| 12 米混合动力 CNG 车 | 850 | 19% |
| 12 米插电式 CNG 混合动力 | 720 | 31% |
| 18 米铰接式传统柴油车 | 2,181 | |
| 18 米铰接式混合动力柴油车 (非插电) | 1,440 | 34% |

Source: Grütter 咨询公司基于表 9 和 10 计算

混合动力公交车大约能够减少 20-35%的温室气体排放。

在郑州运行的 12 米公交车年均行驶里程为 55000 公里，而铰接式公交车年均行驶里程为 65000 公里。每一辆 12 米公交车一年可以减少 CO₂ 排放量约 11-13 吨（CNG 混合动力车），减少 CO₂ 排放量约 19 吨（柴油混合动力车），减少 CO₂ 排放量约 48 吨（铰接柴油混合动力车）。根据目前在郑州运行的混合动力公交车计算，2013 年减少温室气体排放量超过 4 万吨。

当地环境质量影响

如前所述，混合动力公交车对污染物减排的贡献与其燃料的节约率成大体相当，例如与相同排放标准的公交车相比可以减少 25%左右的污染物。插电式混合动力公交车如果持续用电行驶，可以减少更多的污染物排放。在郑州运行的插电式混合动力公交车充满电的情况下可以行驶 30 公里，实现本地零排放。

4.3. 混合动力公交车的经济性分析

4.3.1. 前言

本报告比较了传统公交和混合动力公交的费用支出结构，如下所列：

- 公交有效运行比例：这个指标用来评估公交车辆在维修车间或不能正常运行状态的时间比例。低的公交有效运行比例意味着需要更多的初始投资。例如，如果混合动力公交车的有效运行比例仅为传统公交车的 50%，那意味着公交公司需要购买两辆混合动力公交车才能达到一辆传统公交车的运行服务水平。
- 车辆购置成本；
- 保养成本；
- 燃料价格成本。

车辆驾驶人员的成本和车辆运行管理成本没有包含在本报告的分析中，因为这些成本跟车辆类型关系不大，相对固定。为了进行经济性比较，成本基于标准利率和车轮使用年限折旧进行了年化费用分析。

4.3.2. 公交车辆有效运行里程

国际上目前的研究报告没有提供车辆有效行驶里程的数据。德国²⁶的研究报告表明混合动力公交车较传统柴油公交车低 10%。这一数字并不令人吃惊，因为在德国的研究中一个城市仅有 2-

²⁶ PE International, Abschlussbericht Plattform Innovative Antriebe Bus, realized for BMVBS, 2011

5 辆混合动力公交车在运行，由于缺少维修经验和零部件，使得车辆的维修保养需要更多的时间。在伦敦，有更多的混合动力公交车在运行（600 辆），混合动力公交车的有效运行比例和传统公交车基本一致。郑州目前有 3000 辆混合动力公交车在运行，其混合动力公交车的有效运行比例和传统公交车也基本一致。波哥大仅在半年前开始运行混合动力公交车，其混合动力公交车的有效运行比例和传统公交车也基本一致。

4.3.3. 车辆购买与运营成本

为了使结果具有可信性，我们选择了相同生产厂商、车辆型号和排放标准的车辆进行比较。在波哥大采用了沃尔沃生产的车辆，而在郑州采用了宇通公司生产的车辆。下表比较了在波哥大运行的沃尔沃欧 V 车辆的购买成本。

表 12: 波哥大 12 米公交车的购置成本（美元，欧 V 公交车）

| 柴油 | 柴油混合动力 | 混合动力车辆溢价率 | 备注 |
|---------|---------|-----------|----------------------------------------------------|
| 155,000 | 290,000 | 90% | 扣除电池成本，混合动力公交车价格为 25 万美元。在波哥大，电池的租赁成本为 0.15 美元/公里。 |

来源：基于沃尔沃 12 米双侧开门的欧 V 公交车，不含增值税

沃尔沃公交车采用了磷酸锂离子电池，成本为 4 万美元，使用年限为 4 年²⁷。在波哥大，混合动力公交车的保养成本和传统公交车基本一样。这不包括混合动力公交车的电池保养成本，因为运营企业一般不购买电池，而是采取租赁电池的方式，每公里的租赁成本为 0.15 美元。

下表给出了在郑州采购的宇通公司生产的欧 V 12 米和 18 米长不同类型车辆的购置价格。

表 13: 郑州公交车的购置成本（美元，欧 V 公交车）

| 车辆类型 | 柴油 | 柴油混合动力 | 柴油插电混动 | CNG | CNG 混动 | CNG 插电混动 | 混动车溢价率 | 插电式混动溢价率 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|--------|----------|
| 12 米 | 145,000 | 185,000 | 210,000 | 155,000 | 200,000 | 230,000 | 25-30% | 45% |
| 18 米 | 315,000 | 390,000 | 440,000 | n.a. | n.a. | n.a. | 25% | 40% |

来源：基于宇通公司 2014 年 9 月报价；美元对人民币汇率 1:6.1；混合动力 LNG 公交车只有 18 米的，与 18 米柴油混合动力公交车价格相同

电池和电容的使用寿命基本都为 8 年，这和车辆的使用年限一致（根据中国的法规）。因此，车辆在使用过程中没有电池更新的费用。电池采用锂电池。插电式混合动力车辆充电设施的造价约为 3000 美元。该充电设施可以同时为两辆车充电，每辆车充满电需要 40 分钟。一个充电设施能满足 20-30 辆车的需求。平摊下来，每辆车的充电设施建设成本为 150 美元，因此在后续的分析中没有考虑²⁸。根据郑州公交运营企业的数据库，混合动力公交车和传统公交车的保养成本基本一样，这包括配件的价格和维修保养的时间。

4.3.4. 盈利性

下表为混合动力公交车和传统公交车的盈利性分析采用的主要参数。

²⁷ 见 IDB, Analisis Economico para el Financiamiento de Autobuss Hibridos y Electricos en el Marco del “Sistema Integrado de Transporte” de la Ciudad de Bogota, 2013

²⁸ 此外，郑州的充电站由电力公司提供。

混合动力和纯电动公交车

表 14: 盈利性分析采用的指标 (2014 年 6 月)

| ID | 指标 | 郑州值 | 波哥大值 |
|----|--------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 车辆购置成本 | 参见表 13 | 参见表 12 |
| 2 | 年均保养成本 | 混合动力和传统公交车相近, 不考虑 | 电池成本 0.15 USD/km ²⁹ |
| 3 | 燃料费用 | 柴油: 1.16 美元/升 CNG: 0.52 美元/m ³ 电力: 0.08 美元/千瓦时 | 柴油: 1.12 美元/升 |
| 4 | 燃料节约率 | 参见表 9 | 参见表 6 |
| 5 | 年均行驶里程 | 12 米: 55,000 公里 18 米: 65,000 公里 | 65,000 公里 |
| 6 | 每天耗电量 | 12 米: 40 千瓦时 18 米: 60 千瓦时 | n.a. |
| 7 | 插电式混合动力每天电力驱动行驶里程 | 30 公里 | n.a. |
| 8 | 运营天数 | 300 | 不需要 |
| 9 | 车辆使用年限 | 8 ³⁰ | 12-15 ³¹ |
| 10 | 实际利率 ³² | 3.4% | 9% |

来源: Grütter 咨询公司从运营商处收集整理

下表为波哥大运行的传统柴油车与柴油混合动力公交车的经济性比较。

表 15: 波哥大 12 米柴油混合动力公交车盈利性 (美元)

| 指标 | 柴油 | 柴油混合动力 | 备注 |
|-----------|------|-----------|---------------------------|
| 额外购车成本 | | 95,000 | 不包括电池成本 |
| 年均每公里运行成本 | 0.80 | 0.98-1.03 | 车辆使用年限 15 年 ³³ |

来源: Grütter 咨询公司基于上述数据整理

由于燃料成本、保养以及电池租赁等费用, 混合动力公交车的年均运行总成本要高于传统的柴油车。根据在波哥大的运行情况, 在目前的费用结构, 年行驶里程和燃料消耗强度不能够弥补混合动力公交车超出传统公交车的购车成本。

下表给出了在郑州运行的传统柴油车与柴油混合动力公交车的经济性比较。

²⁹ 基于与沃尔沃签订的服务合同。

³⁰ 政府规定的

³¹ 传统柴油公交车允许运行 12 年, 混合动力车辆允许运行 15 年。

³² 基于 2013 年名义利率减去通货膨胀率 <http://data.worldbank.org/indicator/FR.INR.LEND/countries> and for the inflation rate: <http://data.worldbank.org/indicator/FP.CPI.TOTL.ZG>

³³ 波哥大允许传统柴油公交车允许运行 12 年, 混合动力车辆允许运行 15 年

混合动力和纯电动公交车

表 16: 郑州混合动力公交车的经济性 (美元)

| 指标 ³⁴ | 12 米柴油车 | 12 米柴油混合动力 | 12 米柴油插电式混合动力 | 12 米 CNG | 12 米 CNG 混合动力 | 12 米 CNG 插电式混合动力 | 18 米柴油车 | 18 米柴油混合动力 | 18 米柴油插电式混合动力 |
|-----------------------|---------|------------|---------------|----------|---------------|------------------|---------|------------|---------------|
| 额外投资 | | 40,000 | 65,000 | | 45,000 | 70,000 | | 75,000 | 120,000 |
| 每公里的年均成本 | 0.85 | 0.83 | 0.86 | 0.66 | 0.73 | 0.79 | 1.47 | 1.38 | 1.44 |
| 回收期 (年) ³⁵ | | 6 | 7 | | 18 | 22 | | 4 | 6 |

来源: Grütter 咨询公司基于上述数据计算

在郑州, 柴油混合动力公交车的投资回收期大约需要 4-7 年时间, 其中 18 米长柴油混合动力公交车是投资回收周期最短的车型。CNG 混合动力公交车很难收回投资, 因为 CNG 的价格远低于柴油的价格, 因此节省的燃料价值也较低, 而其车辆的额外购置成本和柴油混合动力公交车差不多。12 米柴油混合动力公交车的内部收益率为 0-10%, 而 18 米插电式混合动力公交车的内部收益率为 7-23%。插电式混合动力公交车的收益率较非插电式混合动力公交车低。然而, 如果插电式混合动力公交车一天充电两次, 在上午高峰后充电和在晚上充电, 则其收益率和普通的混合动力公交车基本一样。

总体而言, 如果柴油混合动力公交车年均行驶里程达到 55000 公里, 柴油的价格维持在 1.2 美元或更高的水平, 且对于 12 米公交车混合动力车的购车成本高出传统车在 5 万美元, 或者 18 米铰接公交车混合动力车的购车成本高出传统车在 8 万美元, 则其在 5 年内可以回收超额的购车成本。如果车辆的年行驶里程超过 55000 公里, 或者柴油价格更高, 则可以容许混合动力车较传统公交车差额购车成本再高一些。

影响混合动力公交车的运营经济性因素主要包括以下几点:

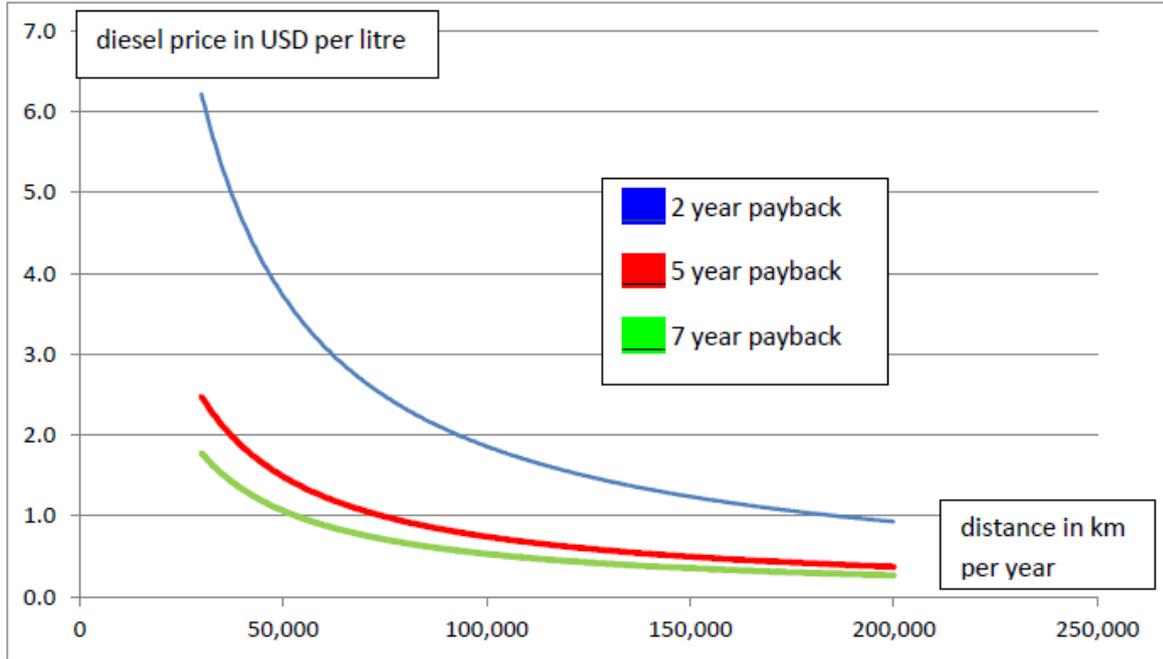
1. 混合动力公交车和传统公交车初始购车成本差值: 混合动力公交车和传统公交车初始购车成本差值每减少 20%, 则投资回收期可减少 1 年。
2. 年行驶里程: 增加 20% 的年行驶里程, 则投资回收期可减少 1 年。
3. 燃料价格: 燃料价格提高 20%, 则投资回收期可减少 1.5 年。
4. 对于插电式混合动力车, 如果每天能够充电两次, 而不是一次, 则投资回收期会减少 1 年。

下图展示了 12 米柴油混合动力车投资回收期与柴油价格和车辆年行驶里程的关系。

³⁴ 与相同燃料类型和车型的传统车辆比较

³⁵ 回收较相同燃料类型和车型的传统车辆的额外投资

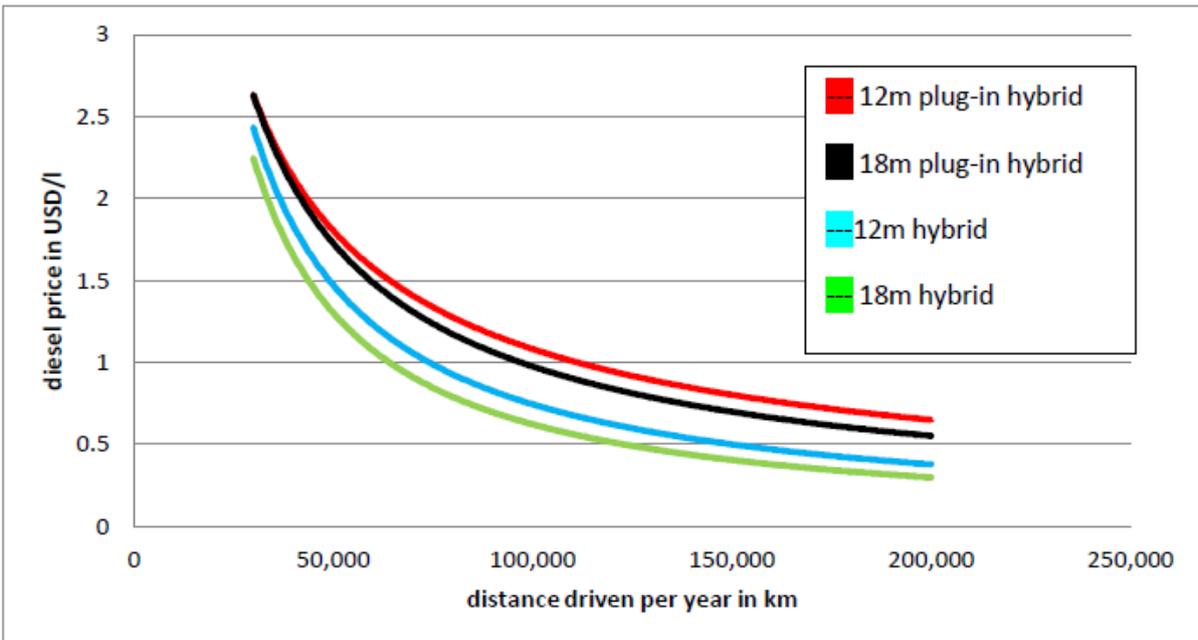
图 12: 12 米混合动力柴油公交车的回报周期与柴油价格和年行驶里程的关系



来源: Grütter 咨询公司基于郑州混合动力公交车和传统公交车的价差计算

下图展示了不同类型的柴油混合动力车为了保持 5 年的投资回报期, 其燃料价格与年行驶里程的动态关系。车辆初始购车成本差异来自郑州数据。燃料价格与年行驶里程的组合在曲线的右方则投资回报周期小于 5 年。

图 13: 相对于 5 年的投资回报周期燃料价格与年行驶里程的动态关系



来源: Grütter 咨询公司基于混合动力公交车和传统公交车的差价 40000 美元

Excel 文件³⁶为公交运营企业提供了一个快速简单的计算混合动力公交车投资回报的工具，只需要补充本地化的数据，如当地的燃料价格，车辆购置费用，电价，车辆年均行驶里程等。

4.4. 混合动力公交车评估总结

混合动力公交车可以显著的节省燃料。这一结论对于不同的车型（12 米或 18 米），不同的燃料类型（柴油、CNG 和 LNG）和不同的生产厂商都适用。从实际的运营观测数据可以推算，与传统柴油公交车相比，混合动力公交车可以减少 25-35%的能源消耗和温室气体排放量，插电式混合动力公交车可以减少 40-50%的能源消耗和温室气体排放量。插电式混合动力公交车节油率取决于其充电的频率（一天一次还是两次）。

从经济性而言，现有混合动力公交车的有效运营里程和传统公交车相差无几，保养费用也基本差不多。电池购置或租赁费用是混合动力公交车较传统公交车的主要支出项目，但这可以通过运行过程中对化石燃料的节约来弥补。除了化石燃料价格以外，初始购车成本差异是混合动力公交车运行经济性的主要影响因素。不同生产厂家的混合动力公交车价格也差异较大，直接影响了混合动力公交车的运行经济性。总体来说，混合动力公交车较传统公交车多出部分的购车成本可以在 5-6 年的运营后收回，前提是油价保持 1.1 美元/升，且车辆年行驶里程在 6000 公里以上。

5. 电动公交车运行评估

5.1. 前言

12 米长的标准电动公交车目前仍然没有普遍应用。目前尚没有基于大规模运营车队数据对电动公交车和传统燃料公交车的运营特征进行比较研究。电动公交车只是在近几年才开始商业化运行，但预期不久的将来该技术将会变的更加成熟³⁷。目前 12 米标准公交车的最大生产厂商是比亚迪公司，最大的商业化运营车队在深圳。深圳自 2011 年开始使用电动公交车，目前大约有 1300 辆纯电动公交车在运行，这些车辆主要是比亚迪和五洲龙公司生产的。本报告的电动汽车运营数据主要来自深圳和郑州。如上所述，深圳目前拥有世界范围内最大规模的电动公交车队。2011 年，郑州采购了 10 辆电动公交车并开始运行，到 2013 年底已经有 110 辆电动公交车。

郑州自 2011 年开始运行 10 辆来自宇通公司生产的 12 米长载客量为 80 人的标准纯电动公交车。这些车辆都没有安装空调系统，因此在夏天运行的很少。在 2013 年采购了 100 辆有空调的电动公交车。在常规的交通状况下，车辆在夜里充电 8 小时后可以行驶约 120 公里。新采购的车辆也可以快充，2.5 小时能够充满电。这些车辆由宇通公司生产，采用可更换电池组的锂蓄电池，通常更换电池需要 10 分钟时间。在电池快要耗尽时，可以将电池换下来，换上充满电的电池组，车辆继续行使，换下的电池在中央充电站充电。可更换电池的技术也被其他车辆生产厂商所采用，具有以下优势：

³⁶ Grütter 咨询公司，混合动力公交车和电动公交车盈利性分析工具，2014

³⁷ 参阅欧盟清洁车辆项目

- 车辆的整车造价会显著降低，因为车辆不需要安装太多电池。较车载充电系统续驶 200 公里所需要的电池容量计算，可更换电池组的车辆续驶里程可以到 100 公里，相比而言可以减少 1/4 的电池需求量。更换的电池组充电时间仅需要 2 小时。
- 车辆自重会显著降低，同时车内有更多的空间容纳乘客。标准 12 米公交车如果续驶里程达到 200 公里需要配备 3 吨重的电池。由于车辆负载轴重的限制，核定的载客数量会显著减少。同时，过重的电池也会引起车辆结构的问题（如电池安装在车顶），或者占用乘客空间（如果电池安装在车内）。
- 车外充电可以通过优化占用较少的空间和减少充电设施。
- 续驶里程不再是一个问题，因为车辆可以在 10 分钟内更换新的电池。

图 7：宇通 12 米纯电动公交车



深圳目前有 1300 辆标准 12 米纯电动公交车，是世界范围内最大的纯电动公交车队。车辆的主要生产厂商为比亚迪和五洲龙。深圳市节能与新能源汽车示范推广领导小组办公室对这一成就起关键性的作用。按照目前的政策，中央政府补贴购车成本的 1/4，深圳当地政府补贴 1/4，公交运营企业负担剩下的 50%，这样就与传统公交车的价格相差无几。在未来的两年，深圳计划再增加 2000 辆第二代纯电动公交车，能耗更低且车内乘客空间更大。

图 8: 深圳公交集团运行的比亚迪公交车



图: Grütter

图 9: 比亚迪公交车的充电站和车内空间

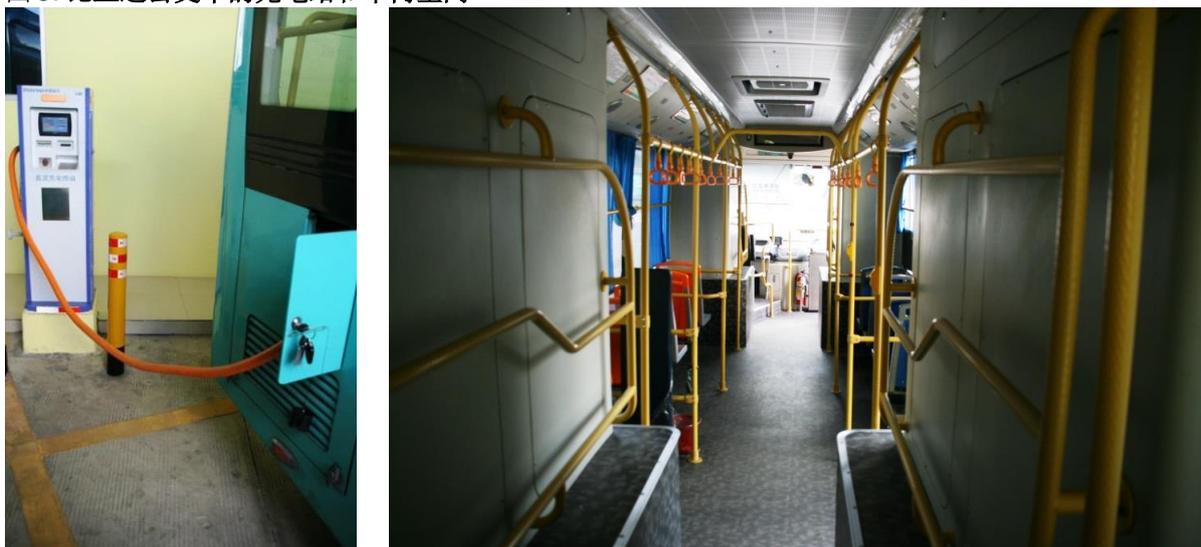


图: Grütter

如上图所示，比亚迪第一代纯电动公交车的车内空间被电池占用较多，乘客空间显著减少。车辆的满载乘客数约为 50 人，这与传统柴油公交车可以载客 80 人还是有较大差距。新一代的比亚迪电动公交车将电池置于车顶，有效地解决了车内乘客空间不足的问题。车载电池的重量约 3.5 吨，为磷酸铁锂电池。电池充电时间为 2-4 小时，在开启空调的情况下车辆续航里程达到 180-200 公里。由于电池安装在车辆顶部，不能很轻易的装卸，因此电池必需在车上充电。根据厂家的资料，电池在使用 3 年后仍有 90% 的蓄能，在使用 10 年后仍有 80% 的蓄能。但是实际的运行数据表明，在使用 3 年后电池只有 80% 左右的蓄能，这也直接影响了车辆的续驶里程。

5.2. 电动汽车的环境评价

5.2.1. 郑州电动汽车环境评价

下表给出了郑州运行的的 12 米电动公交车的电能消耗与传统的柴油公交车的化石燃料消耗情况。

表 17: 12 米电动公交和柴油公交车燃油经济性比较

| 车辆类型 | 电动公交车 | 柴油公交车 |
|------|----------------|-------------|
| 能源消耗 | 100 kWh/100 公里 | 40 升/100 公里 |

来源：郑州公共交通总公司，2014；数据由 Grütter 咨询公司收集和计算；基于每辆车的月燃料消耗量；电动公交车基于 3 年的平均值；之所以采用很长的时间跨度因为电动公交车数量太少。

电动汽车的电力消耗强度是基于旧型号的电动公交车。装有空调的新型电动公交车在 2014 年才陆续开始运行，还没有运营统计数据。

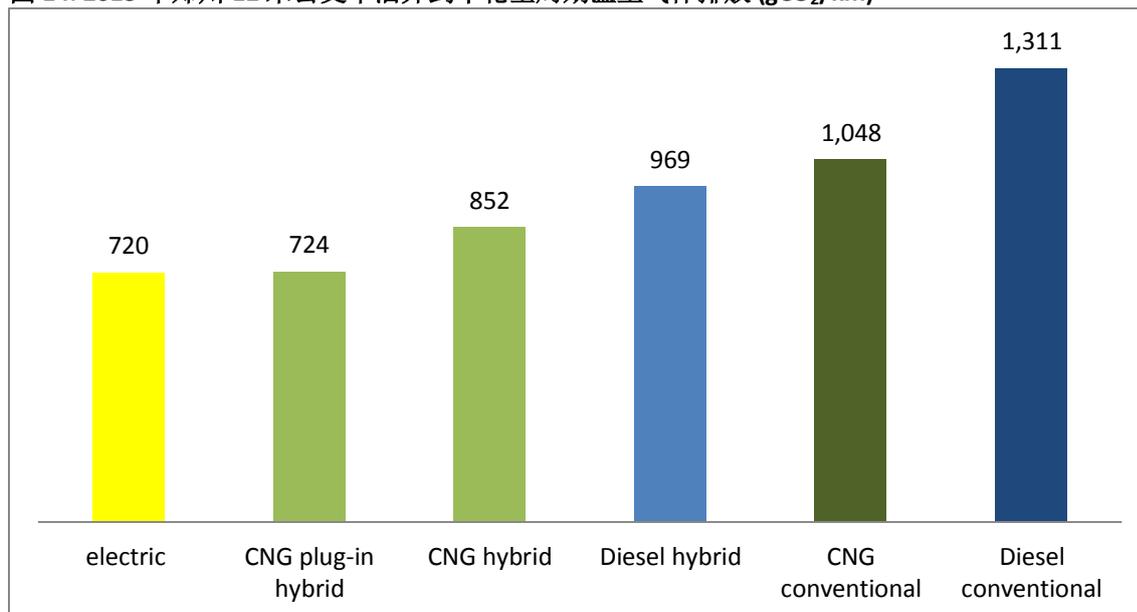
本报告采用 IPCC 推荐的方法计算温室气体排放量。对电动汽车而言，包含了上游电力生产过程的温室气体排放。正确的电力排放因子应该是加权平均的排放因子加上电力传输和配送过程中的损耗³⁸。加权平均的排放因子表示电网内生产单位电能的平均 CO₂ 排放强度。这一排放因子数值通常较在清洁发展机制项目中用的综合边际（CM）排放因子值要低，因为综合边际（CM）排放因子是基于电量边际排放因子（OM，Operation Margin）和容量边际排放因子（BM，Build Margin）的平均值，而电量边际排放因子（OM）不包括所谓的“低成本必需运行电站”，通常指水电和核电发电站。换句话说，电量边际排放因子（OM）反应了热电厂的加权平均排放强度。例如，印度 2011-2012 年电网的平均 CO₂ 排放因子是 0.78 公斤/千瓦时，而同一时期电量边际 CO₂ 排放因子（OM）是 0.97 公斤/千瓦时，容量边际 CO₂ 排放因子（BM）是 0.90 公斤/千瓦时，综合边际 CO₂ 排放因子（CM）是 0.93 公斤/千瓦时。综合边际排放因子（CM）较加权平均排放因子高 20%左右³⁹。大多数电网平均输配电损耗约为 5-10%。由于综合边际排放因子数据公开性较好，因此一般用该值评估不同国家上游电力的排放因子。然而，如果某些国家的电力主要依赖于可再生能源，则加权平均排放因子值显著低于综合边际排放因子（CM），在这些国家电动公交车的温室气体排放因子应该采用加权平均排放因子，而不是综合边际排放因子（CM）。郑州采用的综合边际 CO₂ 排放因子（CM）值是 0.72 公斤/千瓦时⁴⁰。下图给出了 2013 年郑州 12 米公交车不同燃料类型的油井到车轮排放周期的排放因子值。

³⁸ 这是 CDM 项目电力消耗时采用的方法，参阅 ACM0016 大容量快速公交系统

³⁹ GOI, 能源部，中央电力局，印度能源系统 CO₂ 基准线数据库，版本 8.0, 2013

⁴⁰ 中国国家发改委中部区域电力排放因子, 2013

图 14: 2013 年郑州 12 米公交车油井到车轮全周期温室气体排放 (gCO₂/km)



来源: Grütter Consulting

油井到油箱的温室气体排放，在郑州电动公交车较混合动力公交车减少 0-25%，较传统化石燃料公交车减少 30%-45%。虽然在郑州电力主要由燃煤发电，但是其排放强度还是显著降低。

电动公交车运行过程中的排放为零。较传统化石燃料公交车，电动公交车对于减少颗粒物排放，NO_x 排放以及其他污染物排放等有明显优势。插电式混合动力公交车也可以实现运行过程的零排放，当然运行的距离较短。

在郑州，电动公交车主要应用在短途公交线路，且主要在高峰时段运行。其运行频率显著低于传统公交车。这也可以从车辆的行驶里程上有所体现，传统柴油公交车的月均行驶里程大约 4500 公里，CNG 车辆的月均行驶里程为 4000 公里，而电动公交车的月均行驶里程仅为 2000 公里左右。随着新的电动公交车投入运行，电动公交车的月均行驶里程有望增加。基于目前郑州电动公交车的年均行驶里程，110 辆电动公交车一年可减少 1000 吨 CO₂ 排放（平均每车约 10 吨⁴¹），减少 10 吨 NO_x 排放和 0.1 吨颗粒物排放⁴²。

5.2.2. 深圳电动公交车的环境评估

深圳电动公交车的运行数据来自深圳公交集团。深圳公交集团运营着深圳 1300 辆电动公交车中的 500 辆，所有的车辆都配有空调系统。电动公交车的耗电强度约为 1.2 kWh/km。深圳 12 米长柴油公交车的能耗约为 40 升/100 公里，中国南方电网的综合边际排放因子为 0.66 kgCO₂/kWh，因此可以计算深圳电动公交车的 CO₂ 排放强度为 790 克/公里，较郑州高 10% 左右，主要是因为深圳公交车的耗电量更大。考虑到油井到车轮的全生命周期排放，电动公交车较传统公交车排放强度仍然低 40% 左右。然而如果考虑到相同车型的电动公交车的载客能力比传统公交车少 40%，单位乘客的平均排放强度与传统柴油公交车相当。目前比亚迪的新一代电动公交车将电池置于车顶，能够部分解决车内乘客空间不足的问题。假设电动公交车与传统公

⁴¹ 与 50% 的柴油车辆和 50% 的 CNG 车辆；基于油井到车轮全周期；

⁴² 与欧 V 排放车辆比较

混合动力和纯电动公交车

公交车的载客容量一样，年均行驶里程约 4 万公里，则 1300 辆公交车每年可以减少 2.7 万吨 CO₂ 排放，2 吨颗粒物排放和 200 吨 NO_x 排放。

5.2.3. 电动公交车环境影响评估结论

评估电动公交车对温室气体减排影响的核心因素之一是区域的电力构成和电力的碳排放因子。由于综合边际排放因子数据公开性较好，也常被用作近似计算国家范围内电力消耗所产生的上游温室气体排放量。

表 18: 部分国家电力生产排放因子

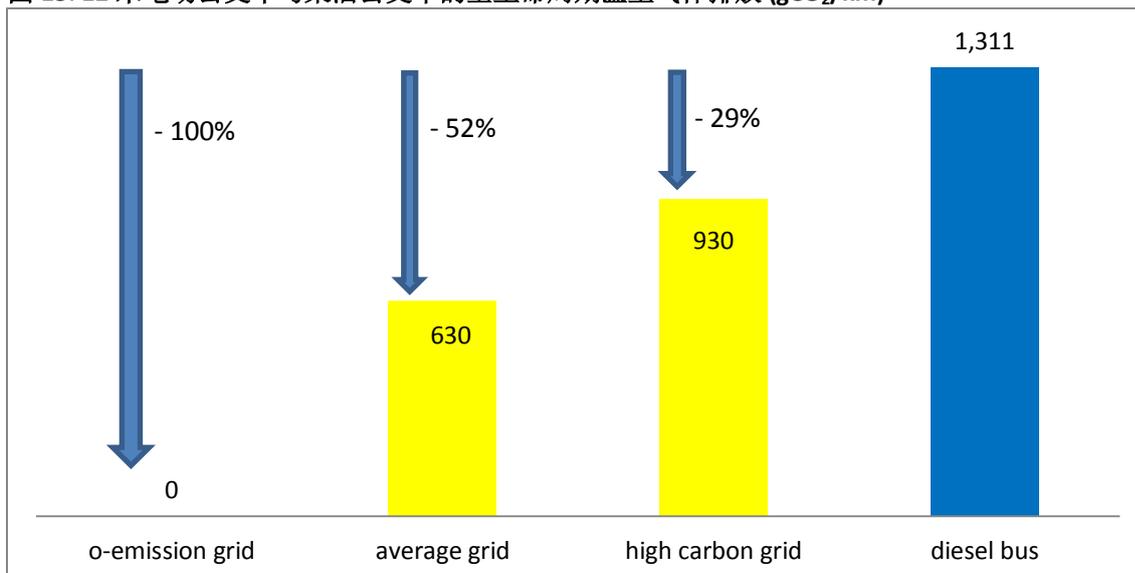
| 亚洲 | 排放因子 kgCO ₂ /kWh | 美洲 | 排放因子 kgCO ₂ /kWh | 非洲 | 排放因子 kgCO ₂ /kWh |
|-------|--------------------------------|---------|--------------------------------|-------|--------------------------------|
| 孟加拉 | 0.64 | 阿根廷 | 0.52 | 埃及 | 0.54 |
| 柬埔寨 | 0.67 | 玻利维亚 | 0.58 | 加纳 | 0.55 |
| 中国 | 0.89 | 巴西 | 0.30 | 伊朗 | 0.61 |
| 印度 | 0.90 | 智利 | 0.60 | 以色列 | 0.72 |
| 印度尼西亚 | 0.76 | 哥伦比亚 | 0.34 | 象牙海岸 | 0.66 |
| 马来西亚 | 0.67 | 古巴 | 0.87 | 约旦 | 0.58 |
| 蒙古 | 1.06 | 多米尼加共和国 | 0.65 | 肯尼亚 | 0.60 |
| 巴基斯坦 | 0.54 | 赤道 | 0.59 | 黎巴嫩 | 0.65 |
| 菲律宾 | 0.51 | 萨尔瓦多 | 0.68 | 利比亚 | 0.79 |
| 韩国 | 0.63 | 危地马拉 | 0.65 | 马达加斯加 | 0.55 |
| 新加坡 | 0.49 | 洪都拉斯 | 0.67 | 摩洛哥 | 0.66 |
| 斯里兰卡 | 0.69 | 墨西哥 | 0.53 | 纳米比亚 | 0.92 |
| 泰国 | 0.55 | 尼加拉瓜 | 0.69 | 尼日利亚 | 0.58 |
| 越南 | 0.56 | 巴拿马 | 0.62 | 卢旺达 | 0.65 |
| | | 秘鲁 | 0.60 | 沙特阿拉伯 | 0.65 |
| | | 乌拉圭 | 0.57 | 塞内加尔 | 0.68 |
| | | | | 南非 | 0.95 |
| | | | | 坦桑尼亚 | 0.31 |
| | | | | 突尼斯 | 0.53 |
| | | | | 乌干达 | 0.55 |

来源: IGES database, 2014

一些国家，如不丹，哥斯达黎加，老挝和巴拉圭等，其电力加权排放因子为 0，这是因为这些国家的所有电力都来自可再生能源⁴³。下图比较了电动公交车采用零排放电力、平均碳排放电力和高碳排放电力等情况与传统柴油公交车油井到车轮全生命周期的温室气体排放强度。

⁴³综合边际排放因子不为 0，因为电量边际排放因子包括化石燃料电厂，因此这些小的备用电厂可以产生相对高的综合排放因子 – 尽管在这些国家并没有反映电网实际的 CO₂ 总体排放因子。

图 15: 12 米电动公交车与柴油公交车的全生命周期温室气体排放 (gCO₂/km)



电动公交车温室气体的减排量很大程度上取决于各个国家的电力构成。较传统公交车而言，平均的减排量约为 50% 或更多。即使电力主要由火电发电构成，其温室气体排放量也显著低于传统柴油公交车。

另一个重要的方面是需要考虑电动公交车的载客能力。一些电动公交车将电池置于车内，占用了很大的乘客空间，减少了载客能力。这就意味着对于 12 米的标准电动公交车必须要跟其在载客能力相当的小型传统公交车相比较。但是，目前电动车厂商倾向于将电池置于车顶，这样电动车与传统公交车有相同的载客能力。

5.3. 电动公交车的经济性

5.3.1. 前言

本报告比较电动公交、传统公交和混合动力公交采用了相同的费用支出结构。

5.3.2. 公交的有效行驶里程

郑州和深圳的运营数据都表明电动公交车实际可用行驶里程较传统燃料公交车少很多，大约是传统柴油公交车的 70%。主要原因包括电动公交车的故障率较高，车辆保养维修时间较长，以及缺少足够的配件。由于关键技术障碍、缺少维修保养人员、车辆保有量少而引起的配件稀缺等原因，电动公交车仍然被视为“异域”的产品。为了保持与传统公交车相同的运营服务水平，公交公司需要配备 1.4 倍的电动公交车辆。

5.3.3. 车辆购置与运行成本

在中国，12 米长柴油公交车的购买成本约为 15 万美元，而 12 米长的电动公交车需要 30 万美元。该价格是基于宇通和比亚迪在中国的定价。在中国以外地区，比亚迪公交车的售价约为 65 万美元。电池成本约占整个车辆造价的 50%。充电站由电力公司投资建设，主要靠卖电来收回成本。

混合动力和纯电动公交车

目前，通常情况是车辆生产厂家出租电池或整车给公交运营企业，包括后期的全部车辆保养服务。理论上电动公交车的保养费用应该较传统公交车低，因为车辆零部件少很多且保养频率低。但现实情况，电动公交车的保养费用较传统公交车高不少，主要原因是生产电动公交车的厂商较少，配件不足，不同车辆间配件的通用性差。在未来，通过提高公交车生产厂商间的竞争和扩大运营车辆规模，可以降低维修保养费用。但是在目前，电动公交车的保养费用较传统柴油公交车要高。这些成本也被计入车辆的有效行驶里程中。

目前车辆电池的使用寿命约为 8 年，这和目前中国公交车的使用年限相一致（基于国家法规规定）。因此不需要考虑更换电池的费用。如果公交车的使用年限更长，如超过 10 年，则更换电池的费用需要考虑在内。

5.3.4. 盈利性

下表给出了电动公交车和传统公交车进行成本收益比较分析的主要参数。

表 19: 郑州/深圳 12 米电动公交车和传统公交车成本 (2014 年 6 月)⁴⁴

| 编号 | 参数 | 电动公交 | 柴油公交车 |
|----|----------------------|-----------------------|---------------|
| 1 | 购车成本 | 300,000 | 150,000 |
| 2 | 有效运行 (百分比) | 70 | 100 |
| 3 | 年保养费用 | 电动公交和传统公交保养费用相差不大，不考虑 | |
| 4 | 燃料费用 | 电: 0.08 美元/kWh | 柴油: 1.16 美元/升 |
| 5 | 燃料消耗强度 | 1.1 千瓦时/公里 | 40 升/100 公里 |
| 6 | 年均行驶里程 | 60,000 公里 | 60,000 公里 |
| 7 | 车辆使用年限 ⁴⁵ | 8 | 8 |
| 8 | 利率 | 3.4% | 3.4% |
| 9 | 标准投入 ⁴⁶ | 430,000 | 150,000 |
| 10 | 年化成本 | 1.12 美元/公里 | 0.83 美元/公里 |

来源：Grütter 咨询公司从郑州和深圳公交公司收集的数据分析整理

要达到相同的运营服务水平，电动公交车的投资是传统柴油公交车的三倍，这主要是因为电动公交车的有效行驶里程少，因此要保持相同的运营服务水平需要更多的车辆。电动公交车的年运营成本较传统柴油公交车低约 2 万美元。这些节约的成本不足以补差车辆初始购置成本的差异。扣除相同的运营支出成本，如司机等，电动公交车的年化每公里运营成本较传统柴油欧 V 公交车的运营成本高约 35%。

5.4. 电动公交车结论

电动公交车的最大优势在于其运行过程中的零排放。如果上游电力是由化石燃料转化的，则也会存在污染排放。然而，发电厂可以通过采取比发动机减排更有效的措施实现减排，而且，与公交车辆的运行区域相比，发电厂通常远离市区和人口稠密地区，其污染物的排放对人们的危害相对较小。只有当电力完全是通过非化石燃料转化而来的，则电动汽车零温室气体排放的优势才会显现。在大多数国家，电动公交车可以减少温室气体排放，当然也包括现代混合动力公交车，特别是插电式混合动力公交车。

⁴⁴ 基于郑州和深圳的平均值

⁴⁵ 由政府规定

⁴⁶ 基于提供相同的服务水平，有效里程比例 100%

从经济性角度看，电动公交车需要更多的投资。电动公交车的购车成本约为传统燃油汽车的两倍，但由于故障率较高，以及服务和维修时间，实际有效运行时间较传统公交车低。这完全是由新技术带来的问题，在 CNG 公交车刚刚引入市场的时候也出现了同样的问题。由于电池的载重 – 直接与车辆续航里程相关 – 导致车辆自重增加较多，也减少了车辆的载客能力（或者由于总载重限制，或者由于车内空间被电池占用）。如果综合考虑电动公交车的有效运行时间低，载客能力限制等因素，在相同的服务水平下，电动公交车的成本约为传统公交车的三倍，而不是两倍。考虑到节油率，电动汽车的年均运行成本较传统公交车低。至于低多少主要取决于不同国家的柴油和电力价格，以及车辆的年行驶里程。由于电动公交车的续航里程较短，目前主要用于短距离市区线路，通常年行驶里程低于整个车队的平均年行驶里程。考虑车辆的初始购置成本和运行过程中的燃料费用，电动公交车的年化成本较传统燃油公交车高 30-40%。

6. 气候融资机会

混合动力和电动公交车在很多国家都得到了政府提供的资金补贴，例如通过气候变化相关的政策（例如英国和瑞士⁴⁷），或者出于环境考虑（例如波哥大），或者是产业政策（例如中国）等。在国际领域，清洁发展机制曾是获得气候融资较好的工具，通过减少温室气体排放获得补贴资金。在印度，4 个电动汽车项目，虽然不是公交车，已经在这一框架下进行了注册。然而，自 2013 年起由于碳价格的急剧下跌，使得这一机制不再具有非常大的吸引力。新的市场机制，如 NAMAs（国家自愿减排行动）似乎更有发展前景，也有提交了关于电动汽车的 NAMA 项目建议书，最近也包括混合动力公交车的建议书。然而，这一工具仍然相对较新，目前还没有成功的案例。下表给出了混合动力和电动公交车领域实现气候融资的可能渠道。

表 20: 气候融资机会

| 编号 | 名称 | 描述 | 链接 |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 国家自愿减排基金 | 初始设立 1.2 亿欧元作为启动资金支持发展中国家实施国家自愿减排行动。在第一回合，两个交通项目获得支持（哥伦比亚 TOD 项目和印度尼西亚可持续城市交通项目） | http://www.nama-facility.org/news.html |
| 2 | 区域发展银行，例如 IDB, ADB, AFD, CAF | 例如在拉美地区 IDB 银行正支持建设多个交通领域 NAMA 项目，也直接参与推动波哥大市和基多市发展可替代能源公交车项目 | www.iadb.org |
| 3 | 清洁技术基金 | 清洁技术基金通过 IDB 银行支持波哥大混合动力和电动公交项目 | https://www.climateinvestmentfunds.org/cif/node/2 |
| 4 | 全球环境基金 | 全球环境基金将混合动力和电动汽车列为可持续交通项目；例如在菲律宾，已经启动的项目，其中一部分内容就是购置一定数量的电动/混合动力公交车 | http://www.thegef.org/gef/home |
| 5 | 其他气候融资链接： http://www.climatefinanceoptions.org/cfo/cfo_search/type%3Afunding_sources%20category%3A219 http://www3.unfccc.int/pls/apex/f?p=116:1:2895636133177913 | | |

⁴⁷ Myclimate 和 Grütter 咨询公司联合注册，在国内的减排项目中，根据混合动力和电动公交车减少的 CO₂ 来付钱。

7. 结论

从公交运营企业的实际观测数据来看，传统的混合动力公交车大约可以节约燃料 25-35%，插电式混合动力公交车预计可以节约 40%以上的燃料。混合动力公交车的运行稳定性，以及除电池之外的维护费用与传统化石燃料公交车相差无几。车辆的初始购置费用差别较大，取决于生产厂商和车辆型号。在正常的运行工况及燃料价格维持在 1.2 美元/升的条件下，混合动力公交车可以在 5-6 年收回混合动力公交车较传统公交车多花费的初始购车成本。碳金融也可以作为一个重要的工具，以减少初始投资的压力，使混合动力公交车更加普及。

纯电动公交车目前仍然没有形成稳定的标准体系，各厂家和研究人员都在尝试利用各种方案解决电池容量、电池重量和电池成本问题，例如采用车载多块电池组（比亚迪），采用快速更换电池组的办法（宇通）或者 TOSA 提出的快速充电公交系统。随着技术不断解决和更新，纯电动公交车有望替代无轨电车。目前，电动汽车的运行可靠性仍然显著低于传统柴油公交车辆，从而导致了额外的投资（在高峰需要配备更多的车辆）。另外，电动公交车辆的维护保养成本理论上应该比传统公交车低。但实际上电动汽车作为新技术导致的车辆备件不足、备件较贵以及维修周期长等问题，其维护保养成本还是较传统公交车高很多。电动汽车的能源消耗强度较传统公交车低，节油效果显著。但是电动公交车的电池组成本较高，且电池组的使用年限较短，导致成本支出过高。这些电池成本远高于所节约的燃料成本。因此，从经济性角度讲，电动公交车远低于传统公交车。然而，电动公交车与传统无轨电车相比存在优势。在不久的将来，电动公交车的成本会显著下降且电池容量会有所提高，从而使整体成本下降。如果实现大规模车队运营，运行的可靠性会有所提升，同时维修保养成本也会下降。

参考文献

C40-CCI, Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleets, 2013

Cambridge econometrics and Ricardo-AEA, an Economic Assessment of Low Carbon Vehicles, 2013

Embarq, Exhaust Emissions of Transit Buses, 2012

Frost & Sullivan, Strategic Analysis of Global Hybrids and Electric Heavy-Duty Transit Bus market, 2013

Fuel Cells and Hydrogen JU, urban buses: alternative powertrains for Europe, 2012

ICCT, Global Transportation Energy and Climate Roadmap, 2012

Landshut University of Applied Sciences, Report on Electrified Public Transport Bus Systems, EU project Ref. D.4.3.6, 2012

PE International, Abschlussbericht Plattform Innovative Antriebe Bus, gefördert durch BMVBS, 2011

Ricardo plc, Air Quality Emissions of Low CO2 Technology for Buses, 2013