

道路货运电动化之路：海南省偏置码头牵引车和混凝土搅拌车案例

作者:牛天林, 崔洪阳, 解奕豪 (国际清洁交通委员会); 郭国柱 (海南省新能源汽车促进中心); 吴松, 李洪庆 (中国汽车技术研究中心)

关键词: 重型车电动化, 零排放重卡, 总拥有成本, 换电技术, 海南

概要

2023年7月, 海南省印发了《海南省新能源汽车推广中长期行动方案 (2023-2030年)》(以下简称《行动方案》)¹。其中, 新能源汽车包括纯电动汽车, 插电混合动力汽车和氢燃料电池汽车。如表1所示, 海南省将道路车辆分成了11个类别, 并在《行动方案》中对大部分类别提出了逐步达成100%新能源汽车销量的时间线, 但并未将重型货车包含其中。

虽然海南省《行动方案》明确了重型货车也需要加速新能源技术转型, 但并没有制定清晰的销量目标。《行动方案》指出, 新能源重卡的销量目标会视情况逐年制定, 并在单独的政策文件中提出, 以此巩固海南在全国新能源重卡部署应用方面的领军地位。

1 《海南日报》, 海南印发新能源汽车推广中长期行动方案, 新华社, 2023年9月, 详见: <http://hq.news.cn/20230809/6e473834f1054d53a3befd6830d76564/c.html>

鸣谢: 本项目由国际气候倡议 (IKI) 项目资助, IKI项目在德国联邦经济事务和气候保护部的领导下开展工作, 同时与其资助方德国联邦环境、自然保护、核安全与消费者保护部以及德国外交部保持紧密合作。

作者在此特别感谢国际清洁交通委员会 (ICCT) 同事毛世越、金伶俐、Hussein Basma和Felipe Rodríguez对本文的审阅并提出建设性意见。对于本报告中的任何错误疏漏, 皆由作者承担相关责任。我们也感谢Jennifer Callahan、Lori Sharn、Valerie Scheckler以及D'Errah Scott在报告编辑和排版设计方面所提供的支持。



on the basis of a decision
by the German Bundestag

www.theicct.org

communications@theicct.org

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

icct
国际清洁交通委员会

表1 海南省2022年新能源汽车销量占比及未来销量目标

车辆类型		2022年新能源汽车实际销量占比 (%)	2025年新能源汽车销量目标 (%)	2030年新能源汽车销量目标 (%)
乘用车	私家车	41	60	100
	公务车	100	100	100
	出租车	100	100	100
	网约车	100	100	100
	租赁车	100	100	100
客车	公交车	100	100	100
	旅游客车	2.3	50	100
	城际客车	69	50	100
货车	环卫车	6.5	60	100
	轻型货车 (< 4.5t)	37	100	100
	中重型货车 (≥ 4.5t)	15	N/A	N/A

参考:《海南省新能源汽车推广中长期行动方案(2023-2030年)》;中国汽车技术研究中心(CATARC)

从市场销量来看,2022年海南省半挂牵引车新车的电动化渗透率达到了20%,在全国各省市中列居第二,其中大部分纯电动半挂牵引车都应用了换电技术,单就换电半挂牵引车而言,海南的市场渗透率高居全国第一。我们同时也注意到,压缩天然气(CNG)和液化天然气(LNG)半挂牵引车在海南同样有很高的销量,2022年销量占比超过了50%。此外,水泥行业常见的混凝土搅拌车在海南也有很高的电动化渗透率,在全国各省市中最高,且2022年新销售的纯电混凝土搅拌车有一半应用了换电技术。

表2 2022年海南省半挂牵引车和混凝土搅拌车销量(按燃料类型划分)

	燃料类型	销量(辆)	渗透率(%)	渗透率全国排名
半挂牵引车 (准牵引总质量>40吨)	柴油	121	28	29
	纯电动(总量/可换电)	84/6	20/18	2/1
	天然气(CNG和LNG)	220	51	4
	甲醇	4	1	3
混凝土搅拌车	柴油	26	12	31
	纯电动(总量/可换电)	191/91	88/42	1/1

参考:北龙泽达科技有限公司(ZEDATA):<http://www.zedata.cn/>

本次研究在两类应用场景下,对海南省纯电换电重卡的实际道路运营情况进行调研,并基于车辆实际运营状况,从投资成本(CapEx)、运营成本(OpEx)和利润表现等层面入手,评估了纯电重卡的总拥有成本(TCO)和经济效益。在研究成果基础上,就如何推动海南省重型货车向零排放化过渡转型形成了一些政策建议。

应用场景调研

2023年, 研究团队调研走访了洋浦港的小铲滩集装箱码头, 参观了集装箱港内的运输作业情况(图1)。小铲滩码头全年的集装箱吞吐量约146万标箱, 由物流公司提供提供的36辆纯电动偏置码头牵引车来承担全部集装箱运输工作。

图1 海南省纯电动偏置码头牵引车



国际清洁交通委员会牛天林 摄

研究团队另调研了华生和鑫海两家水泥厂(图2)。两家水泥厂均使用了50辆左右的纯电混凝土搅拌车来承担混凝土运输工作。纯电混凝土搅拌车分属于两家物流货运公司。

图2 纯电动混凝土搅拌车



国际清洁交通委员会牛天林 摄

此次研究所用的大部分信息都是通过走访车主或运营商获取的, 包括车辆售价、实际能耗、行驶里程、运营成本等。通过对重卡换电站开展调研, 研究团队了解了车辆的实际换电过程和海南当地的换电价格。此外, 团队还通过参与换电重卡的实际运营, 了解了港内集装箱短倒和混凝土运输的实际道路工况。

货车技术规格和实际运营参数

表3列出了两个应用场景下的车辆活动水平、能耗和运费差异。针对港内集装箱短倒运输，我们对柴油、纯电和LNG偏置牵引车的能耗进行了对比。其实当前港内的偏置码头牵引车已实现全部电动化，此处引入内燃机技术车辆进行对比是为了令研究分析结果更加完整。

同样，对于混凝土搅拌车辆，我们也对比了柴油、纯电和LNG三类技术。研究主要针对所调研的两个水泥厂之一开展，目前该厂仍在同时使用柴油和纯电搅拌车，LNG车辆自2021年起已停止使用。此外，我们还引入了氢燃料电池混凝土搅拌车来进行技术路线分析，虽然尚没有氢燃料搅拌车正式投入使用，但地方管理机构正在考虑这一零排放技术路线的可行性。

表3 海南两个换电重卡实际应用场景信息

	港内集装箱短倒	混凝土运输
单次里程	0.5 - 1 km (往返全程)	20-60 km (往返全程)
每日趟次	100-150	10-20
年均活动水平	35,000 km	60,000 km
预期服务年限	12年	5年
运费 ^a	~¥30/km	~¥20/km
柴油重卡能耗 ^b	40 L/100 km (空载) 70 L/100 km (满载)	30 L/100 km (空载) 60 L/100 km (满载)
纯电重卡能耗 ^c	120 kWh/100 km (空载) 300 kWh/100 km (满载)	140 kWh/100 km (空载) 180 kWh/100 km (满载)
LNG重卡能耗 ^d	平均: 60 kg/100 km	平均: 50 kg/100 km
氢燃料电池重卡能耗 ^e	—	平均: 12.5 kg/100 km

^a 运费由物流公司 (车主) 向货主收取，运费来自于车主提供信息，是一个大致的范围，基于不同情况会有变化。

^b 柴油重卡能耗是车主基于实际使用情况估算的。

^c 纯电重卡能耗是基于实际运行中获取的电量变化 (SOC) 和行驶里程估算的。

^d LNG重卡能耗是基于车主实际使用情况估算的。

^e 氢燃料电池重卡能耗是基于实际工况进行能耗模拟获取的。

表4和表5展示了两个应用场景中我们调研或参考的所有货车的技术参数。对于已不再使用的柴油和LNG重卡，我们参考了最新的相关车型。对于氢燃料电池车混凝土搅拌车，我们选取了相同车企生产且已经商业化应用的车型作为参考。

两个场景中的纯电重卡都是换电重卡，并且使用了“电池即服务” (BaaS) 模式进行购买，即车主只需购买重卡车身无需购买电池，这使得纯电重卡的最终售价仅仅略高于柴油车。取而代之的是车主需要在换电时支付额外的电池租赁费用。在BaaS模式下，前期的购车资本支出转化为了后期运营成本，大大降低了纯电重卡的购买门槛，能够增加电动重卡对资金有限的小规模车队车主的吸引力。

当然, 车主在购车时仍可以选择直接购买整车 (车身加电池), 本次研究也对这种购车模式进行了分析。由于港内短倒货车的预期使用年限会大于12年, 而综合走访调研和相关研究经验, 如果购买纯电重卡整车, 通常在7-8年左右就需要对电池进行更新。

表4 港内偏置码头牵引车

燃料类型	柴油	纯电	LNG
车辆型号	ZZ5371TQYM28102	SM4255TORBEV	ZZ5371VDMC32100
制造商	中国重汽	三一海工	中国重汽
品牌型号	豪沃	三一	豪沃
准牵引总质量 (kg)	70,000	70,000	70,000
发动机额定/最大功率 (kW)	196	150/200	196
发动机最大扭矩 (Nm)	1,100	1,400	1,160
发动机排量 (L)	10	—	9.7
燃料存储	300 L (柴油油箱)	141k Wh (电池)	450 L (LNG 储罐)
公告里程 (km)	1,100	120	250
售价 (CNY)	350,000	600,000 (整车) 400,000 (BaaS模式)	400,000

表5 水泥厂混凝土搅拌车

燃料类型	柴油	纯电	LNG	氢燃料电池
车辆型号	SYM5311GJB1F3	SYM5310GJB5BEV9	SYM5311GJB2F1	SYM5312GJB1FCEV
制造商	三一重工	三一重工	三一重工	三一重工
品牌型号	三一	三一	三一	三一
总质量 (kg)	31,000	31,000	31,000	31,000
负载 (kg)	16,670	15,570	16,800	16,130
发动机额定/最大功率 (kW)	226	270/405	257	198/355
发动机最大扭矩 (Nm)	1,500	1,150	1,600	2,400
发动机排量 (L)	7.7	—	9.5	—
燃料存储	300 L (柴油油箱)	282 kWh (电池)	600 L (LNG储罐)	约40kg氢气 + 127 kWh 电池
公告里程 (km)	1,500	180	500	250
售价 (CNY)	350,000	850,000 (w/ battery) 450,000 (w/o battery)	400,000	1,450,000

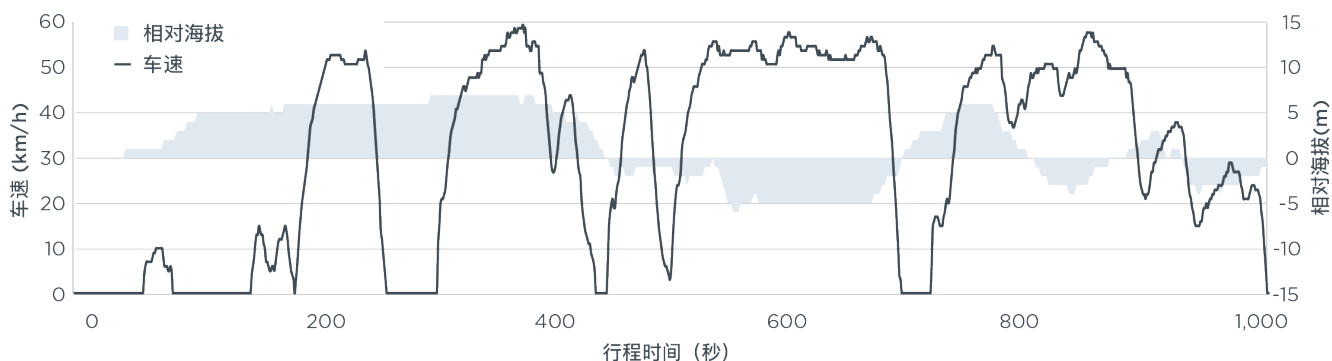
图3和图4展示了港内集装箱短倒和混凝土运输的典型实际道路运营工况，包含逐秒的行驶速度和相对海拔高度。

图3 港内集装箱短倒 (来回) 典型运营工况



国际清洁交通委员会 THEICT.ORG

图4 混凝土运输 (去程) 典型运营工况



国际清洁交通委员会 THEICT.ORG

总拥有成本分析

分析方法

本次研究使用了ICCT的零排放技术能源和成本模型 (AZTEC)²。关于该模型的具体介绍详见ICCT相关研究报告³。在本此研究中，我们在实际使用场景下对表4和表5中的货车进行了总拥有成本分析，研究包含了换电重卡整车购买模式和BaaS模式的对比。下文将总结研究应用的关键基础数据和假设，重点展示不同货车在两种应用场景下的投资成本、运营成本和利润分析结果。

投资成本-购车资金

在本次研究中，所有受访车主均采用了贷款方式来购买重卡（包括电动重卡的整车和BaaS的两种购买模式），首付比例为40%，贷款周期3年，利率10%。柴油和LNG重卡还需额外支付购置税，税额为整车售价的10%（整车售价见表3和表4）。对纯电和氢燃料电池重卡目前免征购置税。

2 国际清洁交通委员会, Analyzer of Zero-Emission Transportation Energy and Costs—Documentation (2022年), 详见: <https://github.com/theicct/AZTEC-doc>

3 牛天林、马云霄、张翌晨著,《道路货运电动化之路: 广东省零排放重型货车市场及泥头车案例》, (华盛顿特区, 国际清洁交通委员会, 2023年), 详见: <https://theicct.org/publication/零排放货车实际应用-nov23/>

我们预期所有重卡车主都会在整个车辆使用寿命周期内使用车辆，港内半挂牵引车的报废周期为12年，混凝土搅拌车的报废周期为5年。中国汽车技术研究中心（CATARC）发布的相关报告支出，中国柴油重卡的残值年均下降率为8%，纯电和燃料电池重卡的残值年均下降率为12%⁴。

运营成本—能源

能源成本取决于车辆的年度活动水平、平均能耗（详见表3）和能源价格。表6展示了本次研究所应用的能源价格（基于海南省能源价格）。

表6 各类能源的补能价格

能源	详情	价格 (¥)
柴油	年均加油价格	7.78/L
电 ^a	基础电价	0.70/kWh
	换电服务费	0.45/kWh
	电池租赁费	0.55/kWh
LNG	年均加注价格	7.50/kg
氢	氢燃料车辆加注价格	80/kg

^a 换电相关的价格均基于每充1度电需要的费用，与电池容量大小无关。

在2021年1月至2023年1月期间，海南省柴油的平均零售价格为¥7.78/L，LNG均价为¥7.5/kg（此次研究采用了上述燃料均价，并设定价格保持不变）。根据电动货车车主报告的信息，电力均价为¥0.7/kWh，换电站的服务费为¥0.45/kWh。也就是说，对于购买了整车（包含电池）的车队运营商而言，需要支付的能源成本为电价+换电服务费，即¥1.15/kWh。而对于BaaS购买模式，车队运营商除了需要支付电价和服务费，还需要额外支付平均¥0.55/kWh的电池租赁费。基于对氢燃料供应商的走访，本次研究应用的氢燃料价格是2023年燃料电池货车加注氢燃料的实际市场价。

4 赵冬昶等著，《中国商用车TCO研究及中美对比》，（天津：中国汽车技术研究中心，2022年），详见：<https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-ctp-20220701/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E5%95%86%E7%94%A8%E8%BD%A6TCO%E7%A0%94%E7%A9%B6%E5%8F%8A%E4%B8%AD%E7%BE%8E%E5%AF%B9%E6%AF%94.pdf/view?searchterm=%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E5%95%86%E7%94%A8%E8%BD%A6+TCO>

其他成本—税费和运维

柴油和LNG货车每年需要基于车辆整备质量缴纳¥96/吨的车船税，对零排放货车免征车船税。此外，海南不收取过路费，但会对柴油货车征收每月最高¥4,400的车辆通行附加费，其他货车无需缴纳通行附加费⁵。表7列出了海南本地车队车主需要缴纳的其他费用。

表7 本研究中不同燃料类型货车的税费和运维成本

		柴油	LNG	纯电	氢燃料电池
偏置码头牵引车	保险费 (元/年)	5,000	5,500	10,000 6,900 (BaaS)	—
	通行附加费 (元/年)	0	0	0	—
	员工及其他 (元/年)	-150,000	-150,000	-150,000	—
混凝土搅拌车	保险费 (元/年)	8,000	8,500	15,000 7,200 (BaaS)	20,000
	通行附加费 (元/年)	36,000	0	0	0
	员工及其他 (元/年)	-130,000	-130,000	-130,000	-130,000

车辆的维修保养成本主要取决于车辆的传动系统类型和使用工况。根据车队运营商和海南当地咨询顾问的评估，本次研究采用的柴油货车的维修保养成为¥0.33/km，LNG货车为¥0.33/km，纯电动货车为¥0.22/km，燃料电池货车为¥0.23/km。上述维修保养成本未考虑更换电池及燃料电池组的费用。轮胎磨损和更换也会对维修保养成本产生影响。不过，目前尚无可用数据来支持我们判断电动货车与柴油货车之间是否存在轮胎使用寿命方面的差异。

收入和利润

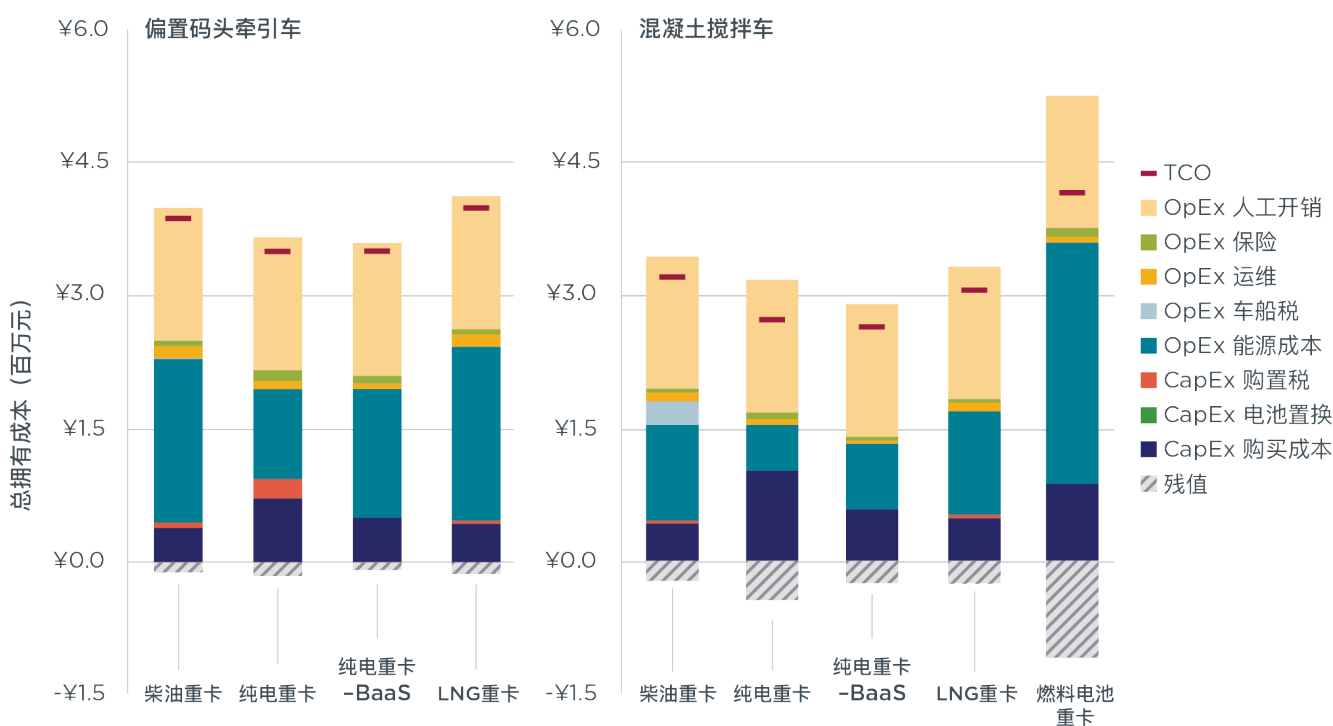
如表3所示，我们基于运费、年均活动水平和不同应用场景下的负载参数对车辆运营成本和收入进行了评估。每辆货车的实际运营利润等于运营总收入减去车辆总拥有成本。

⁵ 海南省交通运输厅，《海南省交通规费征稽局收取车辆通行附加费收费标准》，2022年9月1日，详见：https://jt.hainan.gov.cn/xxgk/sfxm/202209/t20220901_3258480.html

结果与讨论

图5展示了两种使用场景下不同传动系统货车的TCO评估结果。与柴油货车相比，BaaS模式购买的换电货车可实现港口内运输成本降低10%，混凝土运输成本降低17%。在非BaaS购买模式下，纯电动货车也能实现港口内运输成本降低10%，混凝土运输成本降低幅度为15%，略逊于BaaS模式。值得注意的是，在BaaS模式下，车主以租用替代购买电池的方式将部分投资成本分散到了运营成本中，因而大幅降低了前端购置成本，这也会让消费者更愿意选择购买纯电动货车。LNG货车的TCO与柴油货车相仿（±5%）。燃料电池货车的TCO最高，特别是混凝土搅拌车。

图5 海南省偏置码头牵引车和混凝土搅拌车的车辆总拥有成本 (TCO)

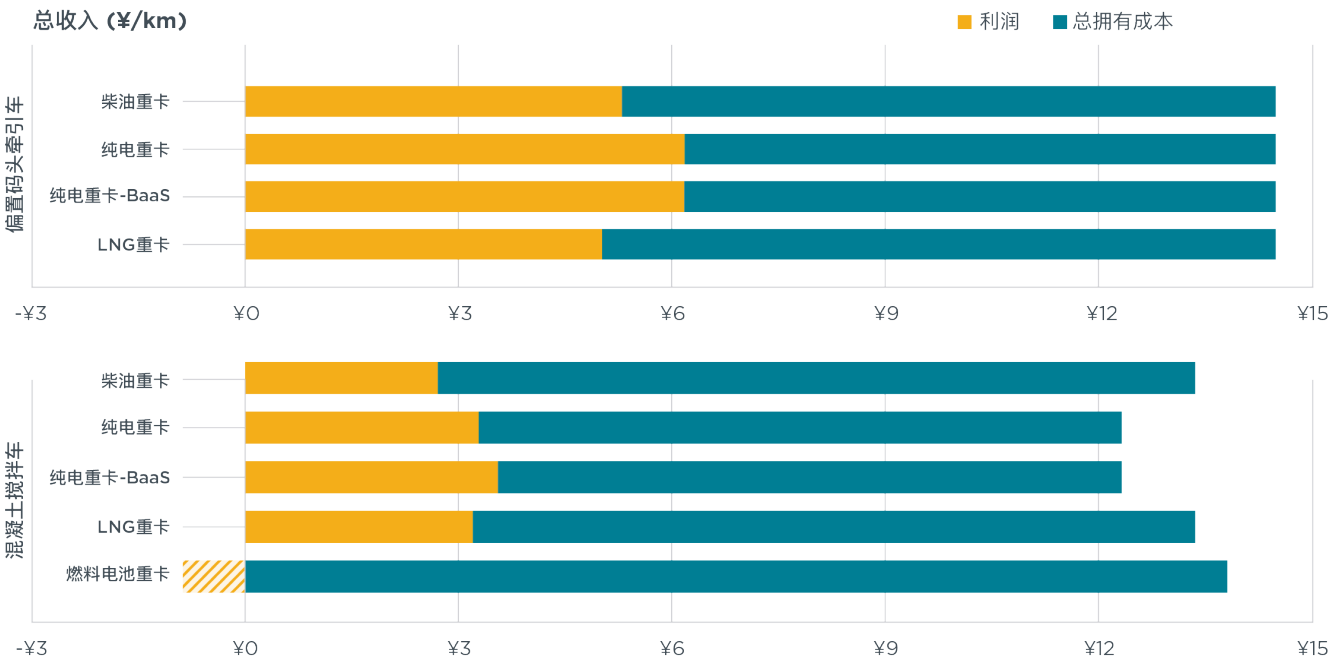


国际清洁交通委员会 THEICCT.ORG

图6展示了车辆在两种应用场景下的单位行驶里程 (km) 经济表现, 包括TCO和运营利润。

- » 无论采用何种传动系统, 港口内使用的偏置码头牵引车的总收入始终保持不变, 因为车辆单次行程总是运送两个集装箱。
- » 电动牵引车的每公里运营利润要比柴油牵引车高出17%; 整车购买和BaaS模式购买会有小幅利润差异。
- » 不同传动系统的混凝土搅拌车会存在总收入差异, 由于电池重量原因, 电动货车的负载能力要低于柴油和LNG货车。
- » 不过, 在BaaS模式下购买的换电混凝土搅拌车的运营利润最多可比柴油车高出32%。
- » 整车购买的电动混凝土搅拌车的利润率不及BaaS模式, 但仍可比柴油混凝土搅拌车的每公里运营利润高出22%。
- » 使用燃料电池混凝土搅拌车或将出现负盈利的情况, 氢燃料加注成本大幅高于燃料电池混凝土搅拌车所能获得的总收入。

图6 海南省偏置码头牵引车和混凝土搅拌车的经济表现



国际清洁交通委员会 THEICCT.ORG

结论与建议

本次研究对海南省纯电动(含换电车型)偏置码头牵引车和混凝土搅拌车的实际运营状况进行了分析。分析结果表明,具备换电功能的纯电动货车在两种应用场景下均能实现比柴油和LNG货车更低的车辆总拥有成本(TCO)和更高的每公里运营净利润。通过BaaS模式购买换电货车能够降低前期购置成本,解决电动货车购买价格较高带来的经济压力,并能够为车队带来更高的经济收益。由于高昂的补能成本,燃料电池货车与柴油货车的TCO差距依然较大,要想缩小这一差距,需要进一步降低燃料电池车辆成本和氢燃料的价格。

根据上述结论,海南省可考虑采取以下三项行动措施来推动重型货车电动化:

1. 海南省可在其新能源汽车推广行动方案中进一步制定新能源重型货车的销售目标。不同行业企业都已采取了主动行动,并在其车队中成功应用了新能源重型货车。本次研究对两个应用案例的分析均展现出积极的TCO前景,这表明设定新能源重型货车销售目标在经济上是可行的。然而,需要认识到的一个关键点在于,新能源重型货车在不同行业应用的实际运营性能可能会存在差异,海南省可考虑针对不同使用场景制定差异化的新能源汽车发展目标。为了制定具有雄心但切实合理的发展目标,对其他新能源重型货车主要应用场景进行分析是十分必要的。

2. 海南可考虑针对特定类型或特定应用场景的重型货车设定新能源汽车销量达到100%的目标。当前研究已经证明电动货车可以再在港口短倒运输、混凝土运输中较传统内燃机车实现成本节约和更高盈利,海南应考虑在这些中短途使用场景下优先推动电动化。为匹配海南省新能源车发展规划,可以考虑对这些场景内的中型货车设定在2030年以前实现100%新能源销量的目标。

3. 海南省可为创新性的电动化转型解决方案继续提供政策激励。激励措施可包括支持换电站的建设和运营,并鼓励发展BaaS等创新的商业模式。海南需要提供足够的充电/补能站点和电池租赁服务,进一步为电动货车的实际运营提供保障。从港口集装箱运输和水泥行业来看,BaaS模式已被证明是车队运营商认可的有效购车途径。海南还可以着力促进车队运营商与换电服务商之间的合作,以帮助推广BaaS模式。



欢迎您阅读本报告后扫码参与调研, 与我们分享您对NDC-TIA项目成果的宝贵意见:
<https://tinyurl.com/ndctia-survey>

www.theicct.org

communications@theicct.org

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

icct
国际清洁交通委员会