不同类型氢燃料电池汽车全生命周期经济性分析及预测研究

马 菁，郭镇松，杨睿涵，兰利波，陈轶嵩，付 佩

（长安大学 汽车学院，西安 710064）

摘　要：氢燃料电池汽车被认为是21世纪具有潜力的新能源清洁动力汽车之一，影响其推广应用的最重要因素是高成本，开展全生命周期经济性分析至关重要。目前国内外学者对氢燃料电池汽车的生命周期成本评价研究主要集中于零部件成本、燃料价格等因素，而考虑国家及地方补贴政策、运维和报废成本以及不同运营里程、不同车型下经济性分析的较少。从用户的角度，通过对购置成本、运营成本、维护成本、回收残值、补能和抗寒影响以及国家和地方补贴等多种因素进行综合分析，建立全生命周期成本模型，针对乘用车、客车和卡车等不同车型，分场景开展经济性成本评价，将其与传统燃油汽车和纯电动汽车的经济性进行对比分析。面向未来，作出经济性预测，并提出一系列对策建议。

关键词：氢燃料电池汽车；全生命周期成本；经济性预测；不同车型

中图分类号：U469.72　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3969/j.issn.2095–1469.2023.04.07

Economic Analysis and Prediction of Life-Cycle Costs for Different Types of Hydrogen Fuel Cell Vehicles

MA Jing，GUO Zhensong，YANG Ruihan，LAN Libo，CHEN Yisong，FU Pei

（School of Automobile，Chang'an University，Xi'an 710064，China）

Abstract: Hydrogen fuel cell vehicles have been identified as promising clean energy options for the 21st century, yet their widespread adoption is hindered by their high cost. It is crucial to conduct a full life-cycle cost analysis to address this issue. However, the majority of existing research has focused solely on aspects such as component costs and fuel prices, with little consideration given to other factors, including national and local subsidy policies, operation and maintenance costs, scrap value, and economic analysis for different operating mileage and vehicle types. To provide a more comprehensive analysis, this article adopts a user-centric approach and examines various cost factors, such as purchase, operation, maintenance, residual value, energy supplementation, cold resistance, and subsidies. A robust life-cycle cost model is established to evaluate the economic benefits of different vehicle types, including passenger cars, buses, and trucks, across a range of scenarios. Moreover, the economic advantages of these vehicles are compared with those of traditional fuel vehicles and pure electric vehicles. Finally, this article makes economic predictions and puts forward a set of policy recommendations.

Keywords: hydrogen fuel cell vehicle; life cycle cost; economic prediction; different vehicle type

收稿日期：2023–03–06　**改稿日期：**2023–03–30

基金项目：中国氢能联盟2022政研项目（CHA2022RP005）；陕西省自然科学基础研究计划青年项目（2023-JC-QN-0464）

参考文献引用格式：

马菁，郭镇松，杨睿涵，等.不同类型氢燃料电池汽车全生命周期经济性分析及预测研究[J].汽车工程学报，2023，13(4)：506–516.

MA Jing，GUO Zhensong，YANG Ruihan，et al. Economic Analysis and Prediction of Life-Cycle Costs for Different Types of Hydrogen Fuel Cell Vehicles[J].Chinese Journal of Automotive Engineering，2023，13(4)：506–516.(in Chinese)

在我国实现“碳达峰、碳中和”目标背景下，发展氢能是保障国家能源战略安全的重要措施之一。氢能在交通领域的应用主要是氢燃料电池汽车，其具有续驶里程长、加注时间短、耐低温等优势，且在使用阶段零排放，被认为是21世纪最有潜力的新能源动力汽车之一。美国、日本、韩国、欧洲等主要发达国家和地区均将氢能和燃料电池技术作为能源技术革命的重要方向和未来能源战略的重要组成部分。我国也高度重视燃料电池汽车及氢能产业发展，并将氢能纳入国家“十四五”规划和2035年远景目标纲要。2021年，国家相继批复了一系列燃料电池汽车示范应用城市群。随着国家对燃料电池汽车相关奖励政策的出台，各地也陆续发布了燃料电池汽车产业规划及支持政策[1-2]。2022年3月，国家发展和改革委员会、国家能源局联合发布《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》[3]，明确了氢能产业的战略定位。即：氢能是未来国家能源体系的重要组成部分，是用能终端实现绿色低碳转型的重要载体，氢能产业是战略性新兴产业和未来产业重点发展方向。

由于铂金属、电堆及储氢罐等关键部件的成本较高，导致氢燃料电池汽车的成本也非常高，这成为制约氢燃料电池汽车推广的重要原因之一[4]。从消费角度来看，氢燃料电池汽车的生命周期成本与传统燃油汽车、纯电动汽车达到平价，是提升其市场渗透率的重要转折点。

关于生命周期成本，国内外学者开展了相关研究。POURIA等[5]对加拿大4个省由传统燃油汽车转变为燃料电池汽车的经济成本进行了分析，研究结果表明燃料电池汽车具有更高的经济性。BEKEL等[6]比较了纯电动汽车与燃料电池汽车的整个生命周期的成本，研究表明燃料电池汽车的全生命周期成本更高。OFFER等[7]研究车辆燃料成本并进行敏感性分析，预测将在2030年、燃料电池汽车的燃料成本与传统燃油汽车的燃料成本相当。RODICA等[8]研究纯电动汽车，从电力系统盈利角度分析得出电池成本是影响纯电动汽车商业推行的最主要因素的结论。CHEN Yuche等[9]比较了纯电动汽车、氢燃料电池汽车等4种主要车型在未来的发展成本和性能。陈轶嵩等[10]将氢燃料电池汽车生命周期成本划分为企业成本、用户成本和社会成本3个视角，建立了多角度的成本模型及预测模型，并从车辆购买价格、氢气价格、政府补贴角度进行了敏感性因素分析。张磊等[11]通过分析不同吨位的氢燃料电池卡车的全生命周期成本并与纯电动汽车和传统燃油汽车进行对比，最后对电堆和整车成本的下降趋势进行了预测。雷雪亚[12]建立了汽车生命周期的总成本评价模型，基于不同时点下零部件成本和燃料价格预测，对燃料电池汽车、纯电动汽车和传统汽油车生命周期内的总成本进行了比较分析。

目前，氢燃料电池汽车的生命周期成本评价体系研究[13-21]涵盖了零部件成本、燃料价格等因素，而考虑国家及地方补贴政策、运维和报废成本以及不同运营里程、不同车型下经济性分析的较少。综合考虑购置成本、运营成本、维护成本、回收残值、补能和抗寒因素以及国家和地方补贴等对生命周期成本的影响结果，可以更全面系统地分析氢燃料电池汽车的经济性并预测其成本的变化趋势，为国家及地方的补贴政策的发布提供更科学的数据支撑。

本文通过考虑购置成本、运营成本、维护成本、回收残值、补能和抗寒影响以及国家和地方补贴等因素，建立生命周期成本模型，对乘用车、客车和卡车的不同车型分场景进行经济性成本分析，并与传统燃油汽车及纯电动汽车进行对比，同时对不同技术路线、不同车型分高低两档运营里程做经济性成本分析。最后，面向未来，作出3个阶段的经济性预测并提出一系列对策建议。

1 方法和数据清单

1.1 汽车生命周期成本框架

生命周期成本是指贯穿产品全生命过程的成本费用的总和，一般来说包含从产品的研究、设计、生产、使用、报废的整个生命过程内所耗费的各种费用。

如图1所示，从用户的角度出发，车辆的生命周期成本包括：初始的购置成本、运行和维护成本、废弃处置成本以及其他因素造成的额外成本。其中，初始的购置成本主要包括购买车辆的投入成本及在此过程中产生的其他成本；运行和维护成本主要是指在车辆使用过程中直接、间接的能源消耗以及维护过程中所投入的成本；处置成本是指生命周期最后废弃阶段有关的部分成本，如果废弃处理过程可产生回收款项应扣除此部分回收款；此外，车辆的续驶里程、补能时长、抗寒能力也间接影响了车辆的经济性。

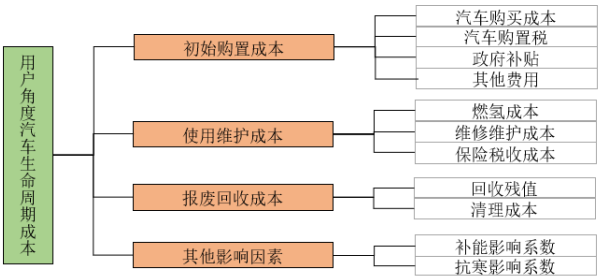

图1 汽车生命周期成本框架

1.2 不同车型应用场景的选取

如图2所示，燃料电池汽车可分为乘用车、客车、卡车等不同车型，存在于不同的应用场景。由于氢燃料电池乘用车发展较慢，不单独细分应用场景。客车主要分为3个应用场景，城市公交、长途客运、短途客运。3种应用场景分别以10.5米城市公交车、11米客车、8.5米客车对应测算经济性。卡车的应用场景非常多，本文按吨位主要分3个应用场景，分别为轻卡物流运输，重卡货运、中卡环卫，分别对应的车型为4.5吨厢式物流车、49吨牵引车（整备质量加准拖挂车总质量为49 t）、18吨洗扫车。

1.3 汽车全生命周期成本模型

全生命周期成本计算公式如式（1）所示。

$$T_C = (T_{FC} + T_{VC} \cdot (1 + \alpha) - T_{REC}) \cdot (1 + \lambda) 。 \quad (1)$$

式中：T_C为生命周期总成本；T_{FC}为初始购置成本；T_{VC}为运维成本；T_{REC}为报废回收成本；α为抗寒影响系数；λ为补能影响系数。

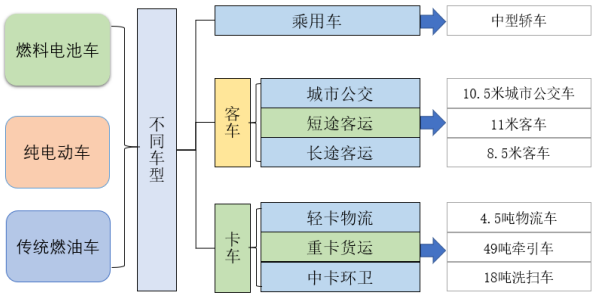

图2 不同车型应用场景的选取

1.3.1 购置成本

车辆初始的购置成本主要包括车辆购买价格、车辆购置税、政府相关的补贴，以及强制性保险和上牌照等其他费用，可表示为：

$$T_{FC} = p_c + t_c - s_c + o_c 。 \quad (2)$$

式中：p_c为车辆购买价格；t_c为车辆购置税；s_c为政府补贴；o_c为其他费用。

1.3.2 运维成本

运维成本包含了运行中的燃料消耗成本和维护成本，可表示为：

$$T_{VC} = f_c + o_{mc} 。 \quad (3)$$

式中：f_c为燃料消耗成本；o_{mc}为维护成本。

1）燃料成本

车辆燃料消耗成本跟车辆的百公里能耗有直接的关系，具体可表示为：

$$f_c = \sum_{i=1}^{t} \frac{L_i \cdot H \cdot P_i}{(1 + r)\hat{}i} 。 \quad (4)$$

式中：L_i为车辆第i年行驶里程；H为车辆每百公里能耗；P_i为第i年单位燃料价格；r为折现率；t为车辆使用周期。

2）维修维护成本

在计算车辆维修与维护费用时，按照一年内各种维修和维护费用之和来计算。在车辆的生命周期内，通过对每年车辆的维修与维护成本进行累加计算，可以求得车辆生命周期内的维修维护成本，如式（5）所示。

$$o_{mc} = \sum_{i=1}^{t} \frac{v_{cr\,i}}{(1 + r)\hat{}i} 。 \quad (5)$$

式中：v_{cri}为车辆第i年的维修与维护成本。

1.3.3 报废回收成本

将报废处理费用与回收车辆的残值看作一个整

体费用，计算公式为：

$$T_{\mathrm{REC}} = v_{\mathrm{sr}} \frac{1}{(1+r)\wedge t} 。\tag{6}$$

式中：v_{sr}为可以重新利用的残值。

1.3.4　其他影响因素

影响车辆经济性的因素还有续驶里程、补能时长、抗寒能力等，将其折算进全生命周期成本中，有续驶和补能影响系数、抗寒影响系数。

1）续驶和补能影响系数

相同的运营时长下，补能的时间越长，有效运营时间就越短，所获利润下降。假设运营时间固定，应获利润额为成本（全生命周期成本）乘以运营利润，其中运营利润以运输行业的平均利润为代表，由于补能时间占用运营时间，将其所导致的营收降低量折算进全生命周期成本。则续驶和补能影响系数可表示为：

$$\lambda = \frac{L \cdot t_n}{D_{\mathrm{TE}} \cdot (1 - B_n) \cdot T_{\mathrm{y}}} (1 + p) 。\tag{7}$$

式中：L为年运行里程；D_{TE}为续驶里程；B_n为每次补能时的能量剩余百分比；t_n为单次补能时长；T_{y}为年运行时长；p为运营利润，以运输业平均利润为代表。假设B_n为30%，T_{y}的数据参考了《全国氢燃料电池汽车示范城市群车辆统计与分析报告》的燃料电池汽车运行数据。

2）抗寒影响系数

抗寒能力同样影响运营维护成本。在寒冷地区的车辆，其冬季续驶里程会衰减，能耗会增加，车辆故障率也会增加，从而导致车辆经济性降低，全生命周期成本增加。寒冷所导致的车辆能耗及车辆故障率的升高可折算到全生命周期成本中，抗寒影响系数可表示为：

$$\alpha = \frac{M_i \cdot k_n}{12} 。\tag{8}$$

式中：M_i为寒冷月数，以东北地区为例，从当年的11月到下一年的3月都是比较冷的月份；k_n为寒冷导致的能耗增加率。k_n的数据参考了《中国新能源汽车大数据研究报告（2022）》的清单数据。

1.4　生命周期成本的关键数据清单

根据文献和市场调研，梳理了氢燃料电池汽车、纯电动汽车和传统燃油汽车的购置成本、政府补贴、燃料成本、补时影响系数等相关数据，不同车型的一些关键参数见表1。其中，燃料电池汽车和传统燃油汽车在低温环境下额外能耗很小，其抗寒影响系数设为0，纯电动汽车的抗寒影响系数根据《中国新能源汽车大数据研究报告（2022）》中寒冷月份的平均能耗数据和正常月份的平均能耗数据对比计算。

此外，运营里程按京津冀城市群、广东城市群的燃料电池汽车运行数据分为低、高两档。乘用车的低、高两档年运行里程分别为12 377 km、24 000 km；客车的分别为37 440 km、67 680 km；物流卡车和重卡的分别为615 60 km、111 240 km；洗扫车的分别为14 400 km、18 000 km。地方补贴政策有形成国补、地补1∶1的，有形成国补、市补、区补1∶1∶1三重补贴的，本文按此将补贴分为3种情况，分别是有国补、国补加地补两重补贴、国补加市补加区补三重补贴。

2　不同运营里程下燃料电池汽车经济性成本

2.1　低运营里程

假设折现率为r=0.05，报废回收残值为售价的5%，车辆使用年限为6年，代入全生命周期成本计算模型，低运营里程下燃料电池汽车、纯电动汽车及传统燃油汽车的不同车型全生命周期成本见表2。不同车型不同技术路线的全生命周期总成本如图3所示。

从图中可以看出，不考虑补助的情况下，燃料电池汽车全生命周期总成本远大于纯电动汽车和传统燃油汽车。考虑国补、市补和区补三重补助的情况下，与其他技术路线相比，氢燃料电池乘用车、客车的全生命周期成本仍要比其他技术路线大；轻卡物流车和中卡专用车的全生命周期成本分别接近燃油汽车和纯电动汽车；重卡牵引车的全生命周期

表 1　不同车型关键参数

车型		乘用车	客车			卡车		
			10.5 米城市公交车	11 米客车	8.5 米客车	4.5 吨厢式运输车	49 吨牵引车	18 吨洗扫车
燃料电池车	售价/万元	87.1	180	190	160	78	142	124.5
	国补/万元	17.1	17.1	25.2	14.4	14.4	37.8	20.295
	其他/万元	0.108 5	0.315 5	0.355 5	0.275 5	0.320 5	0.461 5	0.256 5
	能耗/（kg/百公里）	0.65	5.00	6.50	4.00	2.00	10.00	64.05
	氢价/（元/kg）	35						
	维护成本/元	1 950	6 453	6 853	6 053	9 736	17 813	8 430
	续驶里程/km	730	802	645	800	560	450	400
	补能时长/min	5	11.17			9.24		
	补能影响系数	0.004 7	0.009 5	0.011 8	0.009 5	0.015 8	0.019 6	0.015 7
纯电动车	售价/万元	21.559	70	80	60	21.27	80	121
	其他/万元	0.215 59	0.7	0.8	0.6	0.8	0.212 7	1.21
	能耗/（kWh/百公里）	14.60	90.00	117.00	72.00	36.00	180.00	1 153.00
	电价/（元/kWh）	1.8	1.15					
	维护成本/元	975	3 227	3 427	3 027	4 868	8 907	4 215
	续驶里程/km	505	580	550	520	330	310	400
	补能时长/h	1.6	1.1			0.7	0.5	0.5
	补能影响系数	0.092 7	0.077 5	0.081 7	0.086 4	0.121 7	0.092 6	0.051 1
	抗寒影响系数	0.107						
传统燃油车	售价/万元	15.98	39	41	29	12	45.5	17.6
	购置税/万元	1.598	3.9	4.1	2.9	4.55	1.2	1.76
	其他/万元	0.159 8	0.39	0.41	0.29	0.455	0.12	0.176
	能耗/（kg/百公里）	9.47	21.40	21.40	19.00	13.00	35.00	218.00
	能源价格（元/kg）	8	7.25					
	低维护成本（元）	4 287	13 020	13 420	12 620	23 070	44 480	14 430
	续驶里程/km	730	802	645	800	730	802	645
	补能时长/min	5	11.17			9.24		
	补能影响系数	0.004 7	0.009 5	0.011 8	0.009 5	0.015 8	0.019 6	0.015 7

数据来源：《中国新能源汽车大数据研究报告（2022）》、《新能源汽车推广应用推荐车型目录》、《全国氢燃料电池汽车示范城市群车辆统计与分析报告》、《燃料电池汽车城市群示范目标和积分评价体系》

成本低于其他技术路线。即考虑三重补助的情况下，氢燃料电池重卡的经济性超过了其他技术路线，相比于其他车型，重卡应用场景是氢燃料电池的优势应用场景。

低运营里程下，图 4 给出了不同车型不同技术路线的全生命周期成本构成（不考虑回收残值，氢燃料电池汽车考虑国补、市补、区补三重补助）。考虑补助的情况，氢燃料电池乘用车和客车的全生命周期总成本高于纯电动汽车和燃油汽车。最主要的原因是购置成本高。在运维成本方面，由于国家补贴氢价，氢燃料电池汽车的运维成本与燃油汽车相近，高于纯电动汽车。在额外成本方面，纯电动汽车的额外成本最大，尤其纯电动卡车的额外成本大于乘用车和客车的额外成本，氢燃料电池汽车与

表 2　低运营里程全生命周期成本

成本/万元		乘用车	客车			卡车		
			10.5 米城市公交车	11 米客车	8.5 米客车	4.5 吨厢式运输车	49 吨牵引车	18 吨洗扫车
燃料电池车	购置成本	35.91	129.02	114.76	117.08	35.12	29.06	63.87
	运维成本	2.54	38.36	49.04	31.16	28.16	124.32	176.53
	回收残值	3.25	6.72	7.09	6.34	2.91	5.90	4.65
	额外成本	0.16	1.52	1.85	1.35	0.95	2.91	3.71
	总成本-无补助	86.89	213.36	234.23	196.39	104.71	265.08	299.91
	总成本-国补	69.73	196.15	208.82	181.90	90.15	231.87	279.39
	总成本二重补助	52.58	178.94	183.42	167.40	75.59	198.66	258.88
	总成本三重补助	35.42	161.72	158.01	152.90	61.03	165.45	238.36
纯电动车	购置成本	21.77	70.70	80.80	60.60	22.07	80.21	122.21
	运维成本	2.54	38.36	49.04	31.16	28.16	124.32	176.53
	回收残值	0.80	2.61	2.98	2.24	0.79	2.98	4.51
	额外成本	1.93	10.12	12.73	8.80	9.30	38.44	41.73
	总成本	25.78	90.72	108.43	87.51	43.95	181.38	231.58
传统燃油车	购置成本	17.74	43.29	45.51	32.19	17.01	46.82	19.54
	运维成本	7.28	37.9	38.11	34.22	43.22	106.96	128.98
	回收残值	0.60	1.46	1.53	1.08	0.45	1.70	0.66
	额外成本	0.08	0.53	0.68	0.43	0.66	2.09	1.63
	总成本	24.51	80.26	82.77	65.75	60.43	154.17	149.49

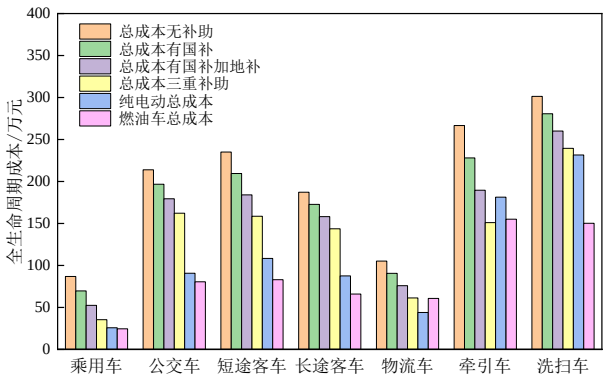

图 3　低运营里程下不同车型全生命周期总成本

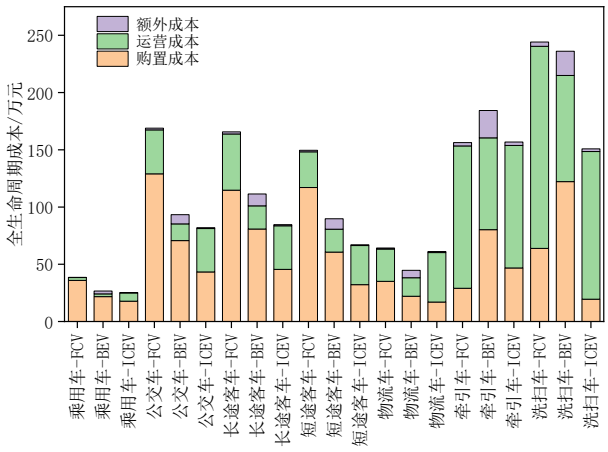

图 4　低运营里程下不同车型全生命周期成本构成

传统燃油汽车的额外成本相近。

2.2　高运营里程

图 5 给出了在高运营里程下，不同车型不同技术路线的全生命周期总成本。从图中可以看出，不考虑补助的氢燃料电池汽车全生命周期成本仍要比纯电动汽车和传统燃油汽车大，但其相对差距与低运营里程相比较小。考虑补助的情况下，氢燃料电池乘用车和客车的全生命周期成本仍要高于其他技术路线，即其经济性较低。氢燃料电池重卡的全生命周期总成本在考虑三重补助后低于其他技术路线，即使只考虑国补加地补两重补助也接近纯电动重卡。因此，重卡是氢燃料电池汽车的优势应用场景。氢燃料电池轻卡的全

生命周期成本低于传统燃油汽车，与纯电动轻卡相近，考虑续驶里程焦虑等问题，在高运营里程下氢燃料电池轻卡相比于其他技术路线有一定的竞争力。

表 3　高运营里程全生命周期成本

成本/万元		乘用车	客车			卡车		
			10.5 米城市公交车	11 米客车	8.5 米客车	4.5 吨厢式运输车	49 吨牵引车	18 吨洗扫车
燃料电池车	购置成本	35.91	129.02	114.76	117.08	35.12	29.06	63.87
	运维成本	4.45	68.04	87.19	55.20	49.56	222.73	220.34
	回收残值	3.25	6.72	7.09	5.97	2.91	5.30	4.65
	额外成本	37.27	192.01	196.98	167.77	83.38	252.54	283.64
	总成本-无补助	88.78	243.12	272.52	210.80	126.69	366.07	343.93
	总成本-国补	71.63	225.92	247.13	196.31	112.09	332.75	323.42
	总成本二重补助	54.48	208.71	221.74	181.82	97.49	299.43	302.92
	总成本三重补助	37.33	191.51	196.34	167.33	82.89	266.10	282.42
纯电动车	购置成本	3.59	23.19	33.31	33.31	24.54	136.36	113.08
	运维成本	0.77	2.46	2.57	2.35	4.03	7.61	1.32
	回收残值	4.36	25.65	35.87	35.66	28.57	143.97	114.40
	额外成本	0.80	2.61	2.98	2.24	0.79	2.98	4.51
	总成本	28.69	107.33	131.94	111.17	65.66	286.94	273.01
传统燃油车	购置成本	17.74	43.29	45.51	32.19	17.01	46.82	19.54
	运维成本	13.66	67.21	67.42	60.72	76.77	191.35	160.91
	回收残值	0.60	1.46	1.53	1.08	0.45	1.70	0.66
	额外成本	0.09	0.67	0.85	0.57	1.29	4.06	1.83
	总成本	30.89	109.71	112.25	92.39	94.62	240.53	181.62

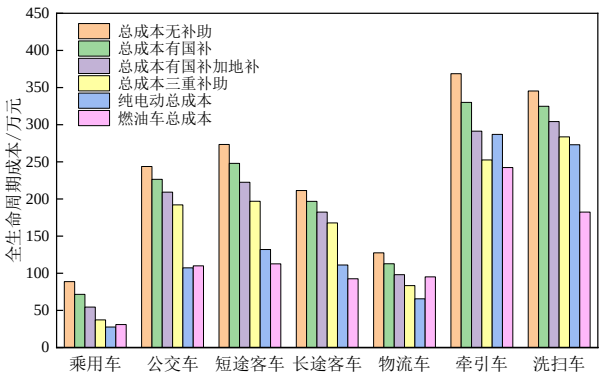

图 5　高运营里程下不同车型全生命周期总成本

图 6 进一步给出了不同车型、不同技术路线的全生命周期成本构成（不考虑回收残值，氢燃料电池汽车考虑国补、市补、区补三重补助）。购置成本体现的是整车成本和国家补贴情况。运维成本和额外成本是燃料电池汽车分别对应传统燃油汽车和纯电动汽车的相对优势成本，体现了燃料电池汽车的能耗优势以及续驶里程、补能时长和抗寒能力优势。此外，额外成本只是车辆的续驶里程、补能时长和抗寒能力等对经济性的影响，实际上这些因素还影响了使用方便性等。例如，考虑上述因素的影响，燃料电池汽车相对纯电动汽车的竞争力会更强。因此，与低运营里程相比，高运行里程下氢燃料电池汽车的经济性竞争力提高。这是因为，在高运营里程下，氢燃料电池汽车处于劣势的购置成本占比减小，处于相对优势的运维成本和额外成本占比提升。

3　典型应用场景下面向未来经济性趋势预测

参考《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》对氢燃料电池汽车的发展预测，结合全生命周期成本计算模型，开展面向未来 2025 年、2030 年和 2035

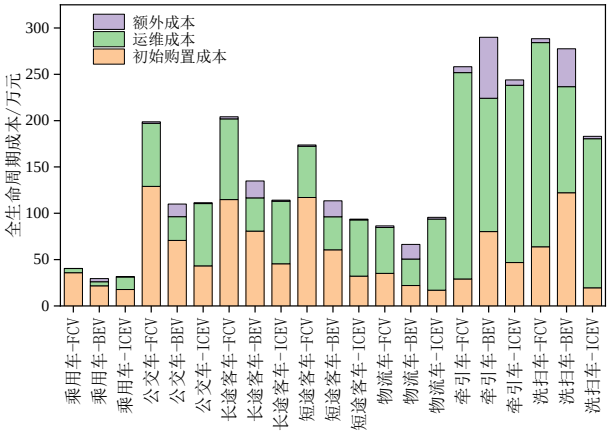

图 6　高运营里程下不同车型全生命周期成本构成

等 3 个时间阶段的不同技术路线、不同车型的全生命周期成本预测，具体数据见表 4。

参考《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》，氢气的加注成本 2025 年达到 40 元/kg，2030 年到 2035 年达到 25 元/kg 以下。此外，对于纯电动汽车，以紧凑型乘用车为例，2020～2025 年成本减少约 1.2 万元，2025～2030 年成本减少约 0.7 万元，2030～2035 年成本减少约 0.5 万元。纯电动乘用车电耗在 2025 年、2030 年、2035 年分别达到 11.0、10.5、10.0 kWh/百公里；纯电动客车电耗在 2025 年、2030 年和 2035 年分别达到 65、60 和 55 kWh/百公里。表 5 列出了 2022～2035 年，氢燃料电池和纯电动汽车的成本、能耗和能源价格。而对于传统燃油汽车，其不同车型的数据变化不大，假设不变。

基于以上数据和假设，图 7 给出了乘用车、公交客车、轻卡和重卡等不同车型的全生命周期成本预测。从图中可以看出，在不考虑补助的情况下，氢燃料电池乘用车全生命周期成本在 2032 年低于传统燃油汽车，在 2035 年接近纯电动汽车。氢燃料电池客车在 2034 年左右全生命周期成本低于其他技术路线。氢燃料电池轻卡全生命周期成本在 2029 年低于传统燃油汽车，到 2035 年接近纯电动轻卡。氢燃料电池重卡预计在 2030 年全生命周期成本低于传统燃油重卡，在 2031 年低于纯电动重卡。

因此，2023～2025 年是氢燃料电池汽车成本降低的关键节点。建议维持现有补贴政策到 2025 年，使氢燃料电池汽车的经济性对比其他技术路线有一定竞争力，从而加速形成规模效应，促进氢燃料电池汽车快速降本，并在 2025 年后逐年退坡，直至 2030 年停止补贴。

表 4　氢燃料电池车续航、能耗、成本等技术路线数据

车型	性能指标	2020 年	2025 年	2030～2035 年
商用车	续驶里程/km	400	500	800
	百公里氢耗/（kg/百公里）	6（客车）	5.5（客车）	10（重货车）
	成本/万元	150	100	50
	寿命/万公里	20	40	100
	电堆功率密度/（kW/kg）	2.0	2.5	3.0
	电堆寿命/h	11 000	16 500	30 000
	电堆成本/（元/kW）	2 500	1 200	400
乘用车	续驶里程/km	500	650	800
	百公里氢耗/（kg/百公里）	1.2	1.0	0.8
	成本/万元	80	30	20
	寿命/万公里	10	25	30
	电堆功率密度/（kW/kg）	3	4	6
	电堆寿命/h	5 500	5 500	8 000
	电堆成本/（元/kW）	3 500	1 800	500

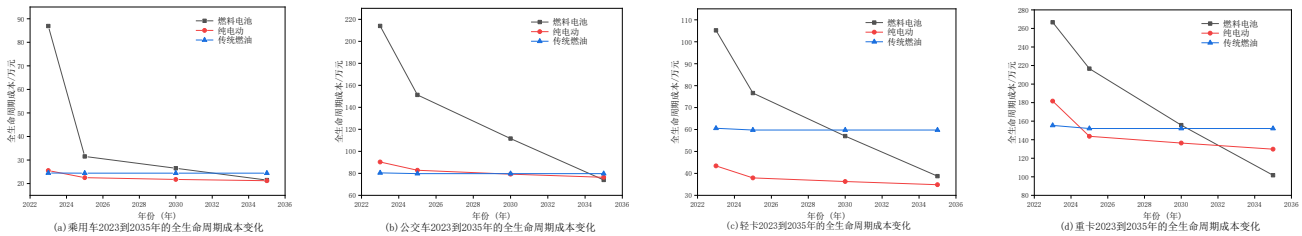

图 7　不同车型 2023～2035 年的全生命周期成本变化

表 5　燃料电池车和纯电动车 2022～2035 年的成本和能耗

燃料电池车和纯电动车 2022～2035 年的成本、能耗能源价格			乘用车	客车			卡车		
				10.5 米城市公交车	11 米客车	8.5 米客车	4.5 吨厢式运输车	49 吨牵引车	18 吨洗扫车
燃料电池车	2022 年	成本/万元	87.1	180	190	160	78	158	124.5
		能源价格/（元/kg）				65			
		能耗/（kg/百公里）	0.65	5.00	6.50	4.00	2.00	10.00	64.05
	2025 年	成本/万元	30	120	126.67	106.67	52	105.33	83
		能源价格/（元/kg）				40			
		能耗/（kg/百公里）	0.54	4.58	5.96	3.67	1.83	9.17	58.71
	2030 年	成本/万元	25	90	95	80	39	79	62.25
		能源价格/（元/kg）				30			
		能耗/（kg/百公里）	0.49	3.54	4.60	2.83	1.42	7.08	45.37
	2035 年	成本/万元	20	60	63.33	53.33	26	52.67	41.5
		能源价格/（元/kg）				25			
		能耗/（kg/百公里）	0.43	2.50	3.25	2.00	1.00	5.00	32.02
纯电动车	2022 年	成本/万元	21.56	70	80	60	21.27	78	121
		能源价格/（元/kg）	15.6	55.9	80.3	80.3	36	200	1 025
	2025 年	能耗/（kg/百公里）	20.36	66.10	75.55	56.66	20.09	73.66	114.26
		成本/万元	14.4	51.6	74.12	74.12	33.23	184.62	946.15
	2030 年	能源价格/（元/kg）	19.66	63.83	72.95	54.71	19.4	71.13	110.34
		能耗/（kg/百公里）	13.33	77.14	100.29	61.71	30.86	154.29	988.29
	2035 年	成本/万元	19.16	62.21	71.09	53.32	18.9	69.32	107.53
		能源价格/（元/kg）	12.7	70.71	91.93	56.57	28.29	141.43	905.93

4 结论与建议

1）从氢燃料电池汽车经济性分析中可知，氢燃料电池重卡在未来大规模推广中具有潜在优势。燃料电池的重卡应用场景有经济性优势，燃料电池客车与其他技术路线的竞争力低于燃料电池重卡。此外，燃料电池轻卡与其他技术路线相比也具有一定的竞争力，由于轻卡单车成本低于重卡，用户转型使用燃料电池车更容易。

2）燃料电池汽车的经济性竞争力将快速提升。导致燃料电池汽车经济性下降的最主要原因就是购置成本高，但燃料电池汽车降本潜力大，需求规模也越来越大，规模效应将导致燃料电池汽车快速降本，燃料电池汽车的经济性竞争力将快速提升。

3）燃料电池汽车更易在高运营里程应用场景下获得推广和应用。燃料电池汽车在高运营里程下，经济性竞争力更强。由于其处于劣势的购置成本占比减小，处于相对优势的运维成本和额外成本占比增加。所以燃料电池汽车更易在高运营里程的物流、重卡载货以及公交场景推广应用。

参考文献（References）

[1] 北京市经济和信息化局.北京市氢能产业发展实施方案(2021-2025 年)[Z].北京:北京市经济和信息化局,2021.

Beijing Municipal Bureau of Economy and Information Technology. Implementation Plan for the Development of Hydrogen Energy Industry in Beijing Municipality

(2021-2025)[Z]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Economy and Information Technology, 2021.(in Chinese)

[2] 广东省发展改革委.广东省加快氢燃料电池汽车产业发展实施方案[Z].广州:广东省发展改革委,2020.
Guangdong Provincial Development and Reform Commission. Implementation Plan for Accelerating the Development of Hydrogen Fuel Cell Vehicle Industry in Guangdong Province[Z].Guangzhou: Guangdong Provincial Development and Reform Commission, 2020.(in Chinese)

[3] 国家能源局.氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)[Z].北京:国家能源局,2020.
National Energy Administration. Medium and Long-Term Plan for the Development of Hydrogen Energy Industry (2021-2035)[Z].Beijing: National Energy Administration, 2020.(in Chinese)

[4] 中国汽车工程学会.节能与新能源汽车技术路线图2.0[M].北京:机械工业出版社,2021.
China Society of Automotive Engineers. Technology Roadmap for Energy Saving and New Energy Vehicles 2.0 [M].Beijing: China Machine Press, 2021.(in Chinese)

[5] POURIA A, ERIK K.Comparative Life Cycle Assessment of Hydrogen Fuel Cell Passenger Vehicles in Different Canadian Provinces[J].International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(38): 12905-12917.

[6] BEKEL K, PAULIUK S. Prospective Cost and Environmental Impact Assessment of Battery and Fuel Cell Electric Vehicles in Germany[J].The International Journal of Life Cycle Assessment, 2019, 24(12): 2220-2237.

[7] OFFER G J, HOWEY D, CONTESTABILE M, et al. Comparative Analysis of Battery Electric, Hydrogen Fuel Cell and Hybrid Vehicles in a Future Sustainable Road Transport System [J]. Energy Policy, 2010, 24 (12): 24-29.

[8] RODICA L, GUZAY P, CHRISTIAN T. Large-Scale Deployment of Electric Vehicles in Germany by 2030: An Analysis of Grid-to-Vehicle and Vehicle-to-Grid Concepts [J].Energy Policy, 2014, 65: 432-443.

[9] CHEN Yuche, MELAINA M. Model-Based Techno-Economic Evaluation of Fuel Cell Vehicles Considering Technology Uncertainties[J]. Transportation Research Part D, 2019, 74: 234-24.

[10] 陈轶嵩,兰利波,郝卓,等.多角度氢燃料电池汽车全生命周期成本分析研究[C]// 2021中国汽车工程学会年会论文集(6).北京:机械工业出版社,2021.
CHEN Yisong, LAN Libo, HAO Zhuo, et al. A Multi-Perspective Study on the Life Cycle Cost Analysis of Hydrogen Fuel Cell Vehicles [C]//Proceedings of the 2021 Annual Conference of China Society of Automotive Engineers (6). Beijing: China Machine Press, 2021.(in Chinese)

[11] 张磊,谢南宏,曹田田,等.氢能在交通领域的应用及燃料电池汽车成本分析[J].石油石化绿色低碳,2022,7(4):1-5,30.
ZHANG Lei, XIE Nanhong, CAO Tiantian, et al.Analysis and Countermeasures of Clogging of Debutanizer Column Reboiler[J].Green Petroleum & Petrochemicals, 2022, 7(4): 1-5, 30.(in Chinese)

[12] 雷雪亚.基于生命周期总成本分析的燃料电池汽车典型应用场景研究[C]// 2021中国汽车工程学会年会论文集.北京:机械工业出版社,2021.
LEI Xueya. A Study on Typical Application Scenarios of Fuel Cell Vehicles Based on Life Cycle Cost Analysis [C] //Proceedings of the 2021 Annual Conference of China Society of Automotive Engineers. Beijing: China Machine Press, 2021.(in Chinese)

[13] 衣宝廉.燃料电池的原理、技术状态与展望[J].电池工业,2003,8(1):16-22.
YI Baolian. Fuel Cell: Fundamental, Technology and Prospect[J].China Battery Industry, 2003, 8(1): 16-22.(in Chinese)

[14] 章桐.中国燃料电池汽车产业链的现状及发展[J].汽车纵横,2020(12):17-19.
ZHANG Tong. Current Situation and Development of Chinese Fuel Cell Vehicles Industry Chain [J]. Auto Revierw, 2020(12): 17-19.(in Chinese)

[15] 谭旭光,余卓平.燃料电池商用车产业发展现状与展望[J].中国工程科学,2020,22(5):152-158.
TAN Xuguang, YU Zhuoping. Development Status and Prospects of Fuel Cell Commercial Vehicle Industry[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 152-158.(in Chinese)

[16] 陈轶嵩，兰利波，郝卓，等.面向碳中和的新能源汽车全生命周期评价研究综述及趋势展望[J].汽车工程学报，2022，12(4)：360-374.
CHEN Yisong，LAN Libo，HAO Zhuo，et al.Review and Future Prospects of Life Cycle Assessment of New Energy Vehicles Towards Carbon Neutrality[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering，2022，12(4)：360-374.(in Chinese)

[17] 刘佳慧.氢燃料电池汽车生命周期评价[D].西安：长安大学，2020.
LIU Jiahui. Life Cycle Assessment of Fuel Cell Vehicle [D].Xi'an：Chang'an Unversity，2020.(in Chinese)

[18] 孔德洋，唐闻翀，柳文灿，等.燃料电池汽车能耗、排放与经济性评估[J].同济大学学报(自然科学版)，2018，46(4)：498-503，523.
KONG Deyang，TANG Wenchong，LIU Wencan，et al. Energy Consumption，Emissions and Economic Evaluation of Fuel Cell Vehicles [J]. Journal of Tongji University (Natural Science)，2018，46(4)：498-503，523.(in Chinese)

[19] 陈轶嵩，丁振森，王文君，等.氢燃料电池汽车不同制氢方案的全生命周期评价及情景模拟研究[J].中国公路学报，2019，32(5)：172-180.
CHEN Yisong，DING Zhensen，WANG Wenjun，et al. Life Cycle Assessment and Scenario Simulation of Four Hydrogen Production Schemes for Hydrogen Fuel Cell Vehicles [J]. China Journal of Highway and Transport，2019，32(5)：172-180.(in Chinese)

[20] 陈轶嵩，丁振森，刘佳慧，等.面向2020年的质子交换膜燃料电池汽车生命周期评价及预测[J].中国机械工程，2018，29(21)：2546-2552.
CHEN Yisong，DING Zhensen，LIU Jiahui，et al. Life Cycle Assessment and Prediction of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Vehicles for 2020 [J]. China Mechanical Engineering，2018，29(21)：2546-2552.(in Chinese)

[21] 刘宗巍，史天泽，郝瀚，等.中国燃料电池汽车发展问题研究[J].汽车技术，2018(1)：1-9.
LIU Zongwei，SHI Tianze，HAO Han，et al.Research on Main Problems Associated with Development of Fuel Cell Vehicle in China [J]. Automobile Technology，2018 (1)：1-9.(in Chinese)

作者简介

马菁（1986-），女，陕西省渭南人，博士，副教授，主要研究方向为燃料电池经济性及减碳潜力分析、车载电池热管理。
Tel：15596833292
E-mail：jingma@chd.edu.cn

通信作者

付佩（1994-），女，陕西西安人，博士，工程师，主要研究方向为燃料电池技术与氢燃料电池汽车全生命周期评价。
Tel：15686012518
E-mail：peifu@chd.edu.cn