

LCA 模式下乘用车新能源动力与传统动力 CO₂ 排放分析

段练 杜维明 王禄

(中国第一汽车股份有限公司产品策划与项目管理部, 长春 130013)

【欢迎引用】段练, 杜维明, 王禄. LCA 模式下乘用车新能源动力与传统动力 CO₂ 排放分析[J]. 汽车文摘, 2023(1): 16–24.

【Cite this paper】DUAN L, DU W M, WANG L. CO₂ Emission Analysis of New Energy and Traditional Powertrains Based on LCA Assessment for Passenger Cars[J]. Automotive Digest (Chinese), 2023(1):16–24.

【摘要】随着乘用车电动化的普及, 其动力总成也从单一内燃机动力发展到混和动力、纯电动和氢燃料电池动力以及氢内燃机动力, 在生命周期评价(LCA)模式下, 车辆匹配不同的动力总成会产生不同的 CO₂ 排放量。根据中国电能和氢能的构成和制备方法, 分别按照单位电功率和单位氢气消耗量计算 CO₂ 排放量, 进而计算不同车型、不同动力总成乘用车实际的 CO₂ 排放数值。根据计算结果, 在 LCA 模式下: (1) 纯电动比单一内燃机动力总成在常温下可减少 48%~57% 的 CO₂ 排放量; (2) 在低温下可减少 31%~44% 的 CO₂ 排放量; (3) 在常温下, 按照目前的制氢和储运方式, 氢燃料电池动力的 CO₂ 排放量比混合动力车型低 10%, 是纯电动车的 1.5~1.6 倍。

关键词: 乘用车 CO₂ 排放量 生命周期评价 新能源汽车

中图分类号: U471.23; TK401 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20220073

CO₂ Emission Analysis of New Energy and Traditional Powertrains Based on LCA Assessment for Passenger Cars

Duan Lian, Du Weiming, Wang Lu

(Product Planning and Program Management, China FAW Cooperation Limited, Changchun 130011)

【Abstract】 With the popularization of electrification of passenger cars, its powertrain has also developed from a single Internal Combustion Engine (ICE) to a hybrid power, pure electric and hydrogen fuel cell power and hydrogen ICE power. In the Life Cycle Assessment (LCA) mode, the vehicles matched different powertrains will produce different quantity of CO₂. According to the CO₂ composition and preparation methods of electric energy and hydrogen energy in China, the CO₂ emission for the consumption of unit electric power and unit hydrogen is calculated separately, and the actual CO₂ emission value of passenger cars of different models and different powertrains is calculated. According to the calculation results, under LCA mode, (1) pure electric powertrain can reduce CO₂ emissions by 48%~57% compared with a single ICE powertrain at normal temperature; (2) CO₂ emission can be reduced by 31%~44% at low temperature; (3) under the current mode of hydrogen production, storage and transportation, the CO₂ emission of hydrogen fuel cell power is 10% lower than that of Hybrid Electric Vehicle, and is 1.5~1.6 times that of pure electric vehicle.

Key words: Passenger Car(PC), CO₂ emission, Life Cycle Assessment(LCA), NEV

缩略语		HEV	Hybrid Electric Vehicle
		PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
LCA	Life Cycle Assessment	BEV	Battery Electric Vehicle
PC	Passenger Car	FCV	Fuel Cell Vehicle
SUV	Sport Utility Vehicle	HICEV	Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle		
ICEV+48V	Internal Combustion Engine Vehicle+48V	CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage

PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell

1 前言

传统汽车尾气排放所造成的环境污染已成为全球面临的重大挑战,为满足2030年碳达峰和2060年碳中和的目标,乘用车的动力总成从单一内燃机动力向混和动力、纯电动和氢燃料电池动力以及氢内燃机动力发展。大力推广以清洁能源为燃料的环境友好型新能源汽车,逐渐成为我国解决上述问题的重要战略举措。

目前,汽车生命周期环境影响的研究领域相对成熟,但较为缺乏乘用车新能源动力与传统动力横向比较。本文根据现阶段中国电能和氢能的构成和制备方法,在LCA评价模式下计算不同动力总成乘用车在行驶过程中产生的CO₂排放量,但并不涉及不同动力总成乘用车在生产制造过程中所产生的CO₂排放量。

2 LCA模式下不同发电方式CO₂排放量对比

电能按照输入能源的类型,主要可以分为火电、水电、核电、光电和风电,其它的发电方式(如地热能、潮汐能)发电量很少,本文不详细论述。

不同发电模式其效率和CO₂排放量均有很大的差异。全生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是主要的CO₂排放计算方法。本质上,LCA是一种评估产品生产过程及其使用过程给环境带来的负面效应的客观评价方法,主要是通过检测、识别和评判某种产品在整个生命周期中所带来的环境影响或潜在影响。因此,对工业产品全生命周期深度分析能够有效节约资源、减少能耗和保护环境,具有显著的社会效益和经济效益^[1]。在非LCA评价中,水电、核电、光电和风电在生产电的过程中不产生CO₂,但在LCA评价中,上述的发电模式也会产生一定的CO₂,其CO₂排放量很低。LCA模式下,不同发电方式的CO₂排放量见表1^[2-7]。

2.1 不同发电方式发电量及其占比分析

目前,我国的发电方式主要以火电和水电为主。2011—2021年,我国各种发电模式的发电量和总量如表2所示,不同发电模式发电量占比见表3。由于地热发电、潮汐海浪发电、燃油发电等发电模式的占比极低,且无准确数据支持,未对这些发电模式发电量及总量进行统计。

2.2 单位电功率CO₂排放量

各个国家和地区由于地理位置、GDP总量、技术水平、能源构成均有很大不同,所以其电能总量和构

成均不相同,从而导致单位电功率所产生的CO₂的排放量有很大差异。

表1 不同发电模式的CO₂排放量^[2] g/kW·h

发电模式	LCA评价	
	范围	取值
风能-离岸(Wind)	9.0~17.0	13.0
风能-陆地(Wind)	7.0~10.8	9.0
水力发电(Hydroelectric)	17.0~22.0	20.0
太阳热能-聚光(CSP)	8.5~24.3	24.3
太阳光伏-地面电站(Solar PV)	10.0~29.0	29.0
生物质(Biomass)	43.0~1 730.0	43.0
地热能(Geothermal)	15.1~55.0	38.0
核能(Nuclear)	9.0~70.0	66.0
天然气(Natural gas)	506.0	506.0
天然气+CCUS(Natural gas)	179.0~405.0	405.0
煤(Coal)	1 168.0	1 168.0
煤+CCUS(Coal)	230.0~935.0	935.0

注:(1)由于离岸风能发电和陆地风能发电2种模式的CO₂排放量有所不同,为计算方便CO₂取值为11 g/kW·h。(2)生物质能发电所产生的CO₂排放量区间很大,这里按多数资料的CO₂取值,即43 g/kW·h。(3)目前情况下,中国天然气发电以及燃煤发电的CCUS技术尚未大面积应用,计算时取值为未使用CCUS技术的CO₂排放量。

在计算某年单位电功率(本文单位电功率均按1 kW·h计算)所产生的CO₂排放量 β 时,需要将各种电力的占比和各种发电模式下单位电功率所产生的CO₂排放量的乘积进行加权计算(如, β_{2020} 为2020年单位电功率CO₂排放量)。

根据表1和表3可以分别计算LCA和非LCA这2种方式下CO₂排放量,在非LCA中虽然生物质、水电、核能、风能和光伏发电不产生CO₂,但在LCA评价中,这些发电方式也会产生少量的CO₂排放。根据我国2011—2021年的发电量数据,可以计算出每年单位电功率CO₂的排放量,计算结果如表4所示。

从表4可以看出,随着绿能和核能占比的提高,单位电功率CO₂排放量逐渐降低。在未来,假设全部使用绿能和核能发电,其CO₂的排放量将达到最低值29.90 g/kW·h(假设水电占比为40%,生物质5%、核电、风电各20%和光伏15%)。

2.3 制氢及储运产生的CO₂排放量

氢气是一种无污染的燃料,在燃烧的过程中只产生H₂O,不产生CO₂,但由于氢气仅以各种化合物形式存在于水中、醇类以及各种矿物燃料中,且自然界中也没有任何释放氢气的生物,所以氢气必须通过人工反应才能制取。在制氢过程就会产生一定的CO₂,不同的制氢方式会产生不同的CO₂排放量。

表2 2011—2021年中国不同发电方式发电量及总量

亿kW·h

年份/年	火电			水电	核电	风电	光伏	总计
	煤	天然气	生物质					
2011	38 377.0	108.8	0	6 989.4	863.5	703.3	6.0	46 939.2
2012	38 928.1	110.3	0	8 721.1	973.9	959.8	36.0	49 618.9
2013	32 470.1	116.4	0	9 202.9	1 116.1	1 412.0	84.0	44 285.1
2014	44 001.1	133.3	0	10 728.8	1 325.4	1 599.8	235.0	57 890.1
2015	42 841.9	166.9	0	11 302.7	1 707.9	1 857.7	395.0	58 105.2
2016	44 370.7	188.3	650.0	11 840.5	2 132.9	2 370.7	665.0	61 379.8
2017	47 546.0	203.2	795.0	11 978.7	2 480.7	2 972.3	1 178.0	66 155.7
2018	50 963.2	215.5	906.0	12 317.9	2 943.6	3 659.7	1 769.0	71 653.4
2019	52 201.5	236.5	1 111.0	13 044.4	3 483.5	4 057.0	2 240.0	75 026.4
2020	53 302.5	257.0	1 326.0	13 522.1	3 662.5	4 665.0	2 611.0	77 763.1
2021	50 300.0	2 848.0	3 315.0	13 401.1	4 075.0	6 556.0	3 270.0	83 765.0

注:1. 2011—2015年中国生物质能发电量暂无数据,取值0 kW·h进行计算。2. 2020年天然气发电量暂无数据,暂且认为正常按比例增长,取值为257 kW·h。

表3 2011—2021年中国各种发电模式发电量占比 %

年份/年	火电			水电	核电	风电	光伏	总计
	煤	天然气	生物质					
2011	81.53	0.23	0	14.89	1.84	1.5	0.01	100
2012	78.23	0.22	0	17.58	1.96	1.93	0.07	100
2013	78.02	0.21	0	16.95	2.06	2.60	0.15	100
2014	75.78	0.23	0	18.53	2.29	2.76	0.41	100
2015	73.44	0.29	0	19.45	2.94	3.20	0.68	100
2016	70.92	0.31	1.06	19.29	3.47	3.86	1.08	100
2017	70.36	0.31	1.20	18.11	3.75	4.49	1.78	100
2018	69.56	0.3	1.26	17.19	4.11	5.11	2.47	100
2019	67.78	0.32	1.48	17.39	4.64	5.41	2.99	100
2020	66.51	0.33	1.71	17.39	4.71	6.00	3.36	100
2021	60.05	3.41	3.96	16.00	4.86	7.82	3.90	100

目前我国工业制氢主要有4种方式:煤制氢、化工副产物中提氢、天然气制氢和电解水制氢^[10]。

(1)煤制氢主要以水和煤为原料,制造水煤气,从而制取氢气。

(2)工业副产品制氢主要指焦炉煤气、氯碱尾气、烷脱氢、甲醇、合成氨工业副产氢气,主要分布在钢铁、化工等行业,提纯利用其中的氢气。

(3)天然气制氢是以天然气和水为原料,通过甲烷水蒸气重整法制氢。

(4)电解水制氢主要分为碱水电解(AWE)、固体聚合物(PEM)水电解,固体聚合物阴离子交换膜(AEM)水电解、固体氧化物(SOE)水电解4种模式,目前以碱水电解、固体聚合物水电解为主。

表4 2011—2021年单位电功率CO₂排放量β g/kW·h

年份/年	LCA 评价
2011	957.77
2012	919.92
2013	917.45
2014	891.89
2015	865.66
2016	837.28
2017	830.99
2018	821.95
2019	801.92
2020	787.45
2021	728.68
未来	29.90

注:暂未考虑地区差异

在我国现有的制氢方式中,煤制氢是主要氢气来源,其次是天然气制氢和工业副产品制氢,而电解水的制氢量最低,仅为1%。各种制氢方式所占比例见图1^[11]。

煤制氢和天然气制氢这2种方法,在制氢过程均产生一定量的CO₂的排放。目前,煤制氢方式制取单位氢气(单位氢气均按1 kg计算)的CO₂排放量为20 kg;天然气重整制单位氢气的CO₂排放量为10 kg,如进一步采用碳捕集、利用与封存技术(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术,则煤制单位氢气CO₂排放量降低到2 kg,天然气醇类重整制单位氢气CO₂排放量降低到1 kg^[12],但是如果以LCA模式下评估

CCUS技术,则在捕集、利用与封存每单位的CO₂过程(包括直接、间接、上下游、建设和退役过程排放)中,会产生约20%的CO₂排放量^[13-14],所以在LCA模式下如采用CCUS技术,煤制单位氢气CO₂排放量约为5.6 kg,天然气醇类重整制单位氢气CO₂排放量为2.8 kg。而采用工业副产品提纯制氢和电解水制氢可以认为在制氢过程中不产生CO₂,不同方式制取单位氢气所产生的CO₂排放量和成本如图2所示。

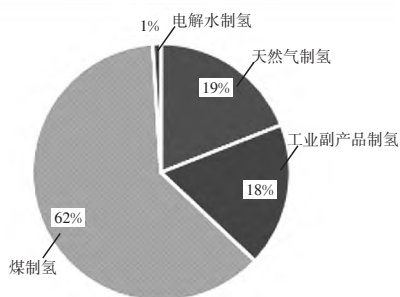
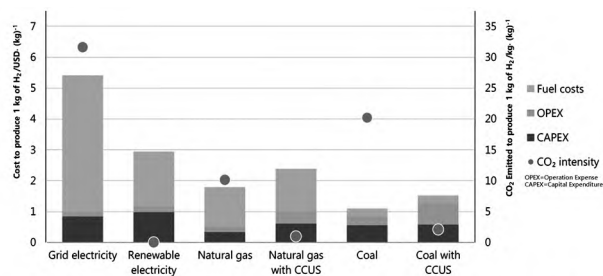


图1 我国现有制氢方式占比^[11]



Notes: CAPEX of coal with CCUS = USD 1.475/kW_{th}. Renewable electricity costs = USD 30/MWh at 4,000 full load hours. More information on the underlying assumptions is available at www.iea.org/hydrogen2024.

图2 不同方式制取单位氢气所产生的CO₂排放量^[12]

上述数据仅仅是制氢过程中所产生的CO₂排放量,在LCA评价模式下,制氢原材料的开采、运输,制氢后的提纯、压缩和储运环节,以及基础设施建设环节排放的CO₂也必须考虑。其中,储运方式影响很大,不同的储运方式排放的CO₂有所不同,本文以高压气态储氢方式、20 MPa长管拖车运氢为基础计算CO₂排放^[15]。此外,除了电解水制氢的纯度较高以外,其它3种方法制氢的杂质含量较高,需要经过多次提纯后才能应用,这也需要消耗一定的能源和氢气损失,间接造成CO₂的排放量增加。这里需要指出的是如采用CCUS技术后,其制氢过程中的CO₂会大大减少,但是其它相关环节所产生的CO₂排放依旧不变。

电解水制氢效率较高,一般为75%~85%,制取单位氢气总耗电量为50~55 kW·h(本文取耗电量50 kW·h,按80%效率计算),此外,制取单位氢气需要消耗纯水量为9 kg。虽然电解水制氢的纯度较高,再提纯过程耗能较少可以忽略不计,但是在压缩、储运

环节仍需要消耗一定的能量。

目前,单位氢气在原材料开采、提炼、运输,以及制氢后提纯、压缩、储运的各个过程中所产生的CO₂暂无准确数据,但是上述过程的整体数值可根据单位电功率电解所得到的氢被加注到FCV车辆上,仅能产生电量为0.3 kW·h^[16]用于驱动电机的实际数值进行推导。

设定电解水制氢的效率为80%,PEMFC燃料电池的系统效率为45%,则在压缩、储运过程的效率为85%(实际数值为83.3%),则单位电功率电解所得到的氢被输送到FCV车辆上,在压缩、储运过程中需要消耗的能量折合成电量为0.12 kW·h,则单位氢气在提纯、压缩、储运过程中需要消耗的电量为5.825 kW·h(以1 kg氢气理论上可产生33 kW·h计算)。对于采用化石原料制氢由于还有原材料开采、提炼、运输和氢气提纯过程,这些过程的CO₂排放量占比为20%^[17]计算(参考汽油制取过程),则化石原料制氢在原材料开采、提炼、运输,以及制氢后提纯、压缩、储运的各个过程中需要消耗电量为7.28 kW·h,这些电所产生的CO₂按照2021年中国的电力构成可折算出CO₂排放量。

按照上述制氢总量比例、每种制氢方式的CO₂排放量以及过程损耗,按4种模式计算将单位氢气输加注到FCV车辆所产生的CO₂排放量如表5所示,4种模式如下。

表5 LCA评价下不同制氢方式所产生的CO₂排放量 kg

序号	制氢方式	制备1 kg氢CO ₂ 排放量
1	现有各种不同制氢比例下制氢+使用现有电力构成模式储运	19.60
2	现有各种不同制氢比例下制氢+CCUS+使用现有电力构成模式储运	9.31
3	现有电力构成模式下电解水制氢+使用现有电力构成模式储运	43.62
4	绿电+核能电力模式下电解水制氢+绿能(含核能)模式下储运	1.67

注:(1)以2021数据为准;(2)绿能+核能所产生的电能:假设水电占比为40%,生物质5%、核电、风电各20%、光伏15%

(1)按照国内目前不同制氢方式所占的比例计算CO₂排放量,并采用现有的电力构成方式计算其在开采、提纯、压缩和储运过程的CO₂排放量,2者之和为最终的CO₂排放量。

(2)按照国内目前不同制氢方式所占的比例计算CO₂排放量,但对于化石材料制氢增加CCUS方式,并采用现有的电力构成方式计算其在开采、提纯、压缩和储运过程的CO₂排放量,2者之和为最终的CO₂排放量。

(3)按照国内目前的不同发电模式比例所获得电

能,仅采用电解水的方式制氢,并采用现有的电力构成方式计算其在压缩、储运过程的CO₂排放量,2者之和为最终的CO₂排放量。

(4)全部采用绿能+核能所产生的电能,并采用电解水的方式制氢,并全部采用绿能和核能的电力进行压缩、储运等过程,2者之和为最终的CO₂排放量。

3 不同动力总成的乘用车CO₂排放量

3.1 计算对象、数据来源和系数

随着车用新能源技术的发展,动力总成也由传统的内燃机(Internal Combustion Engine, ICE)向纯电动化多种模式发展。目前车用动力总成可分为6种动力:传统动力汽车(Internal Combustion Engine Vehicle, ICEV)、混合动力汽车(Hybrid Electric Vehicle, HEV)、插电式混合动力汽车(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)、纯电动汽车(Battery Electric Vehicle, BEV)和氢燃料电池汽车(Fuel Cell Vehicle, FCV)、氢内燃机汽车(Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle, HICEV)。在LCA评价模式下,对这6种动力乘用车在使用过程中所产生的CO₂排放量进行计算。在计算时,仅考虑以下车型及使用工况:

(1)仅对小型乘用车进行计算,不考虑大型公交车、商用车的使用;

(2)不同轴距车型(从A00级到C级);

(3)不同车型(分别考虑PC和SUV,暂不考虑MPV,不考虑四驱方式);

(4)不同使用工况(NEDC、城市、高速和综合)的对比;

(5)不同使用环境(常温状态和冬季寒冷环境)。

各种车型典型的油耗和电耗均来自公开发表的数据,但这些数据目前绝大部分都是在NEDC循环下所测量和计算的数据,其能耗与实际值偏低。所以在计算实际使用油耗和电耗过程中一般在NEDC的基础上按照一定的系数进行增加,由于实际能耗与车重、风阻系数、动力系统、轮胎、使用环境、工况、驾驶习惯都相关,所以这些系数只是一个平均估算数值。

3.2 车辆的计算模型

3.2.1 ICEV

对于以汽油发动机为主的传统动力ICEV以及HEV,在车辆使用过程中不消耗电能,只消耗汽油燃料,在计算CO₂的排放量时,1 L汽油完全燃烧产生CO₂排放量为2.3 kg,在LCA评价模式下,汽油的开采、提炼以及运输过程的CO₂排放量占比为20%^[17]。其计

算公式如式(1)~式(4)。

$$F_{\text{city}} = F_{\text{NEDC}} \times 1.5 \quad (1)$$

$$F_{\text{highway}} = F_{\text{NEDC}} \times 1.2 \quad (2)$$

$$F_{\text{SW}} = F_{\text{city}} \times 0.7 + F_{\text{highway}} \times 0.3 \quad (3)$$

$$C_{\text{FICE}} = F_{\text{SW}} \times 2.3 \div 0.8 \quad (4)$$

式中:

F_{city} 为城市工况实际油耗;

F_{highway} 为高速工况实际油耗;

F_{SW} 为综合加权油耗;

F_{NEDC} 为官方NEDC循环油耗;

C_{FICE} 为燃油车辆在LCA模式评价综合工况的CO₂排放量。

3.2.2 HEV及ICEV+48V

对于HEV,其油耗对比ICEV最高可降低28%^[18],对于采用48 V技术的弱混车辆其油耗一般比ICEV降低5%~10%,计算时取值7%^[18]。计算公式如式(5)、式(6):

$$C_{\text{FHEV}} = C_{\text{FICE}} \times 0.72 \quad (5)$$

$$C_{\text{FICEV+48V}} = C_{\text{FICE}} \times 0.93 \quad (6)$$

式中 C_{FHEV} 为HEV在LCA模式评价综合工况的CO₂排放量; $C_{\text{FICEV+48V}}$ 为ICEV+48 V在LCA模式评价综合工况的CO₂排放量。

3.2.3 PHEV

PHEV包括2种驱动方式:电机驱动和内燃机驱动。由于PHEV使用多变灵活、情况复杂,其能耗介于BEV和HEV之间,本文不进行具体的计算,但是要指出的是,由于车整备质量较大和ICE动力偏小的原因,如仅使用电驱动方式,其电耗要比BEV略高。如仅使用ICE驱动方式,其油耗也比传统的ICEV略高。

3.2.4 BEV

对于BEV,虽然电耗也同样来自于官方公布的NEDC循环测试下电耗数据,但是在计算实际的电耗时,还需要考虑充电效率(慢充为93%~94%、快充88%)和能量回收因素。由于BEV车辆在冬季低温下的乘员舱采暖耗电、电池低温加热耗电及电池自身低温损耗,导致了BEV在不同的使用环境温度对实际的电耗差别很大,因此计算分为常温 and 低温(-15℃以下)2种工况进行。此外,由于高速工况下车辆风阻的增大、电驱系统效率下降,以及能量回收很少的原因,也导致了BEV高速工况下电耗较高。而对于日常的电池自放电损耗,由于数值很低(1%以下)而不考虑。其计算公式如式(7)~式(14):

常温工况下:

$$P_{\text{city}} = P_{\text{NEDC}} \div \eta \times 1.3 \quad (7)$$

$$P_{\text{highway}} = P_{\text{NEDC}} \div \eta \times 1.5 \quad (8)$$

$$P_{\text{SW}} = P_{\text{city}} \times 0.7 + P_{\text{highway}} \times 0.3 \quad (9)$$

$$C_P = P_{\text{SW}} \times \beta_{2021} \quad (10)$$

对于冬季低温工况:

$$P_{\text{city}} = P_{\text{NEDC}} \div \eta \times 1.8 \quad (11)$$

$$P_{\text{highway}} = P_{\text{NEDC}} \div \eta \times 2.0 \quad (12)$$

$$P_{\text{SW}} = P_{\text{city}} \times 0.7 + P_{\text{highway}} \times 0.3 \quad (13)$$

$$C_P = P_{\text{SW}} \times \beta_{2021} \quad (14)$$

式中:

P_{city} 为城市工况实际电耗;

P_{highway} 为高速工况实际电耗;

P_{SW} 为综合加权电耗;

P_{NEDC} 为官方 NEDC 循环电耗;

C_P 为 BEV 在 LCA 模式评价综合工况的 CO_2 排放量;

η 为充电效率,取值 94%;

β_{2021} 为 2021 年每生产 1 kW·h 电的 CO_2 排放量。

3.2.5 FCV

FCV 是使用高压储气瓶中的氢与空气中的氧通过燃料电池产生电能,并以电动机驱动车辆。由于目前投入市场应用的车型极少,本文以丰田第 1 代 Mirai (A 级车)和第 2 代 Mirai (B 级车)进行计算,同样在实际使用中考虑其实际的气耗,由于该车未在中国国内销售,表中所列出的续驶里程为在 WLTC 测试工况下数据,由于其更接近实际应用数值,故系数偏小,而且第 2 代 Mirai 车由于电堆效率的提升,其氢耗也有所下降。计算公式如式(15)~式(18):

$$H_{\text{city}} = H_{\text{WLTC}} \times 1.2 \quad (15)$$

$$H_{\text{highway}} = H_{\text{WLTC}} \times 1.1 \quad (16)$$

$$H_{\text{sw}} = H_{\text{city}} \times 0.7 + H_{\text{highway}} \times 0.3 \quad (17)$$

$$C_H = H_{\text{sw}} \times \gamma_{2021} \quad (18)$$

式中:

H_{city} 为城市工况下 FCV 氢气耗气量;

H_{highway} 为高速工况下 FCV 氢气耗气量;

H_{sw} 为综合加权 FCV 氢气耗气量;

H_{WLTC} 为官方 WLTC 循环气耗;

C_H 为 FCVLCA 模式评价下综合工况的 CO_2 排放量;

γ_{2021} 为 2021 年加注单位氢气的 CO_2 排放量。

对于 FCV 的 CO_2 排放计算,按 4 种模式进行计算:

(1) 现有各种不同制氢比例下制氢+使用现有电力构成模式储运;

(2) 现有各种不同制氢比例下制氢+CCUS+使用现有电力构成模式储运;

(3) 现有电力构成模式下全部使用电解方法制氢+使用现有电力构成模式储运;

(4) 绿电+核能电力模式下电解制氢+绿能(+核能)模式下储运。

第 2 代 Mirai 在美国实际使用的数值为:城市工况氢耗为 1.08 kg/100 km,高速工况氢耗为 1.02 kg/100 km,综合工况氢耗为 1.06 kg/100 km。

3.2.6 HICEV

对于使用氢作为燃料的 ICE,也要考虑氢的逃逸、制氢过程的电能消耗,这些都与 FCV 相同,但是由于 ICE 的效率偏低(同现有 ICE 热效率为 39%,低于现有 PEMFC 的综合效率 45%),且没有具体车型投入市场销售,缺乏足够的数据支持,本文不做计算。

3.3 计算结果

根据上述公式计算综合工况结果见表 6~表 9。由于在相同类型的车辆中,不同厂家的车辆油耗和电耗均有所不同,所以只是选取了一些典型车型进行计算。

表 6 为 ICEV 车型,并以此为基础计算 ICEV+48V 以及 HEV 的 CO_2 排放量,表 7 为 BEV 车型 CO_2 排放量,表 8 和表 9 分别为丰田 Mirai 一代和二代车型的 CO_2 排放量,表 10 为综合对比数据。图 3 和图 4 是以表 10 计算结果得出的对比曲线。以上数据均为实际综合工况。

表 6 LCA 评价下不同系列的 ICEV、HEV 及 ICEV+48 V CO_2 排放量

车型	ICEV					ICEV+48 V	HEV
	级别	ICE 型号	NEDC 油耗/ $\text{L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$	综合燃油消耗/ $\text{L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$	CO_2 排放/ $\text{g} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$	CO_2 排放/ $\text{g} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$	CO_2 排放/ $\text{g} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$
PC	A0 级	1.5L	5.3	7.473	21.48	19.98	15.47
	A 级	1.5T	6.1	8.601	24.73	23.00	17.80
	B 级	2.0T	7.5	10.575	30.40	28.27	21.89
SUV	小型	1.5T	6.3	8.883	25.54	23.75	18.39
	紧凑型	2.0T	7.7	10.857	31.21	29.03	22.47
	中大型	3.0T	9.0	12.690	36.48	33.93	26.27

表7 LCA评价下不同系列的BEV CO₂排放量

类型	BEV基本车辆信息					常温使用		低温使用	
	级别	车型	电池材料	电池容量/kW·h	续航里程(NEDC)/km	电量消耗/(kW·h)·(100 km) ⁻¹	CO ₂ 排放/kg·(100 km) ⁻¹	电量消耗/(kW·h)·(100 km) ⁻¹	CO ₂ 排放/kg·(100 km) ⁻¹
P C	A0级	BYD海豚	磷酸铁锂	44.9	405	16.04	11.69	21.94	15.99
	A级	小鹏P5	磷酸铁锂	55.9	460	17.58	12.81	24.05	17.52
	B级	小鹏P7	磷酸铁锂	60.2	480	18.15	13.22	24.82	18.08
S U V	小型	BYD PRO	磷酸铁锂	50.1	401	18.08	13.17	24.72	18.01
	紧凑型	蔚来ES6	三元锂+磷酸铁锂	75.0	465	23.34	17.00	31.91	23.26
	中大型	蔚来ES8	三元锂+磷酸铁锂	100.0	580	24.94	19.6	34.12	24.86

表8 Mirai车(1代,A级车)不同制氢方式CO₂排放量

制氢方式	氢气质量/kg	续航里程/km	综合实际氢消耗量/kg·(100 km) ⁻¹	CO ₂ 排放/kg·(100 km) ⁻¹
现有各种不同制氢比例下制氢	4.6	502	1.07	21.02
现有各种不同制氢比例下制氢+CCUS	4.6	502	1.07	9.98
现有电力构成模式下电解制氢	4.6	502	1.07	46.76
绿电+核能电力模式下电解制氢	4.6	502	1.07	1.79

表9 Mirai车(2代,B级车)不同制氢方式下的CO₂排放量

制氢方式	氢气质量/kg	续航里程/km	综合实际氢耗/kg·(100 km) ⁻¹	CO ₂ 排放量/kg·(100 km) ⁻¹
现有各种不同制氢比例下制氢	5.6	650	1.01	19.76
现有各种不同制氢比例下制氢+CCUS	5.6	650	1.01	9.38
现有电力构成模式下电解制氢	5.6	650	1.01	43.97
绿电+核能电力模式下电解制氢	5.6	650	1.01	1.68

表10 不同动力总成乘用车CO₂排放量综合对比分析

kg/100 km

类型	级别	ICEV	ICEV+48 V	HEV	BEV 常温	BEV 低温	BEV 常温(未来)	BEV 低温(未来)	FCV 现有 制氢	FCV 现有制 氢+CCUS	FCV 现有 发电模式	FCV 绿 电+核电
P C	A0级	21.48	19.98	15.47	11.69	15.99	0.48	0.66	暂无数据			
	A级	24.73	23.00	17.80	12.81	17.52	0.53	0.72	21.02	9.98	46.76	1.79
	B级	30.40	28.27	21.89	13.22	18.08	0.54	0.74	19.76	9.38	43.97	1.68
S U V	小型	25.54	23.75	18.39	13.17	18.01	0.54	0.74	暂无数据			
	紧凑型	31.21	29.03	22.47	17.00	23.26	0.70	0.95	暂无数据			
	中大型	36.48	33.93	26.27	19.64	24.86	0.75	1.02	暂无数据			

图5和图6为城市工况对比曲线,图7和图8为高速工况对比曲线。

4 结束语

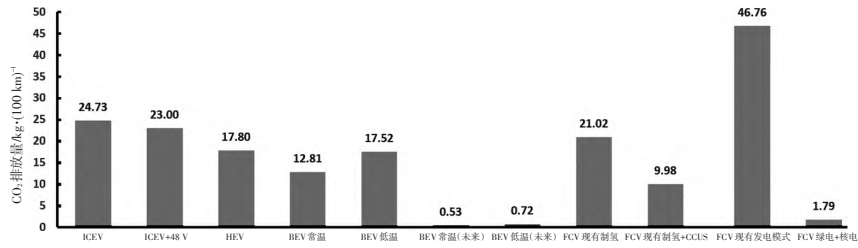
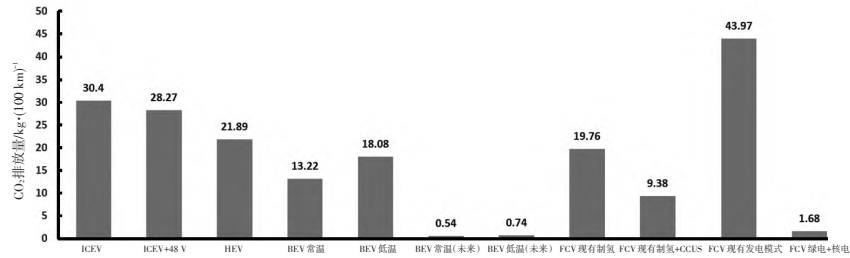
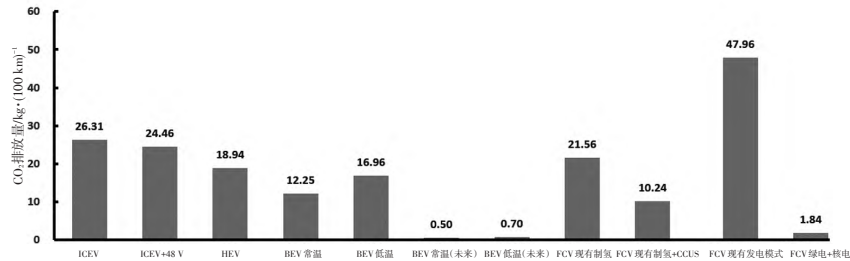
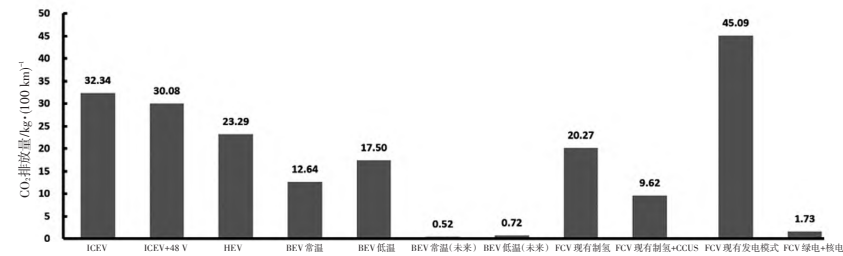
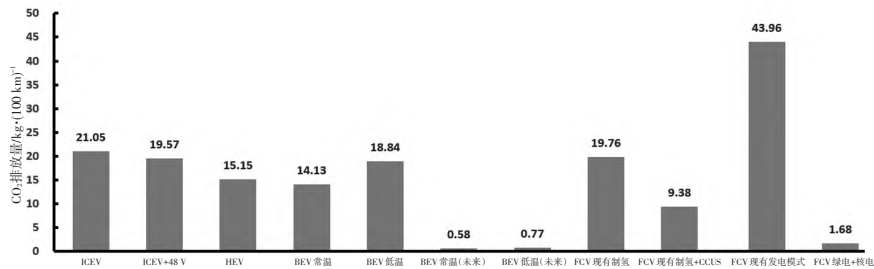
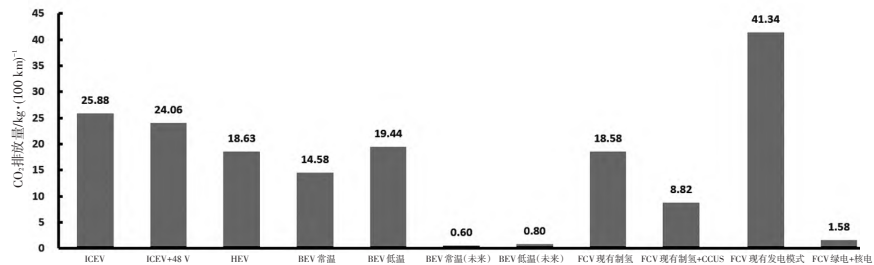
从上述计算数据中可以看出,在LCA评价模式下,在现有电能构成模式和制氢、加氢模式下,不同类型和级别的车型其CO₂排放量均不同:

(1)在综合工况下,对于A级PC车辆,BEV在常温下使用其CO₂排放对比同级别的HEV车可降低28%,相对于ICEV可以降低48%;对于B级PC车辆,其降低CO₂效果更大,相对于ICEV可以降低57%。如果进一

步降低,需要提升绿电和核电在现有电能中的占比。

(2)在综合工况下,如在低温情况下使用,BEV可比HEV降低2%~17%的CO₂排放量。随着降低电池低温损耗技术的进步,BEV的CO₂排放量将进一步降低。

(3)在综合工况下,对于FCV车辆,如采用现有的制氢和储运方式,其CO₂排放量比HEV车型低10%,是纯电动车常温下的1.5~1.6倍。如采用现有的制氢+CCUS和储运方式,其CO₂排放量为现有BEV常温下使用CO₂排放量的71%~78%。但随着现有发电模式中绿电与核电占比的升高,其优势将逐渐降低,当电能全部采用绿电和核电以后,FCV车辆的CO₂排放

图3 A级车不同动力总成CO₂排放量(综合工况)图4 B级车不同动力总成CO₂排放量(综合工况)图5 A级车不同动力总成CO₂排放量(城市工况)图6 B级车不同动力总成CO₂排放量(城市工况)图7 A级车不同动力总成CO₂排放量(高速工况)图8 B级车不同动力总成CO₂排放量(高速工况)

量将高于同级别的BEV车辆3倍以上。

(4)城市工况下, BEV在常温下使用其CO₂排放对比同级别的HEV车可降低35%和46%;相对于ICEV可以降低53%和61%;在低温下, CO₂排放对比同级别的HEV车可降低10%和25%, 相对于ICEV可以降低38%和49%。

(5)高速工况下, BEV在常温下使用其CO₂排放对比同级别的HEV车可降低7%和22%;相对于ICEV可以降低33%和44%;在低温下, CO₂排放对比同级别的HEV车高出24%和4%, 但相对于ICEV可以降低11%和27%。

(6)随着发电模式中绿电与核电占比的升高, 当电能全部采用绿电和核电以后, BEV车辆的CO₂排放量约为现有ICEV车辆的2%。

(7)在LCA模式下, 下一步将各种不同动力系统车辆的全生命周期CO₂排放量(包括回收过程、维修保养过程等的CO₂排放量)与本文所提及的使用过程中CO₂排放量相结合, 计算不同动力系统车辆在生命周期内不同使用里程的CO₂排放量, 并将研究的目标车辆范围扩展到商用车领域。

参 考 文 献

- [1] 王伟晗, 崔伟强, 王清成. 基于产品全生命周期评价的环境影响分析[J]. 应用技术学报, 2020, 20(2): 176-180.
- [2] JACOBSON M Z. Evaluation of Proposed Solutions to Global Warming, Air Pollution, and Energy Security[J/OL]. Energy & Environmental Science. (2014-05-23)[2022-06-18]. https://www.researchgate.net/profile/Mark-Jacobson-2/publication/200457959_Review_of_solutions_to_global_warming_and_energy_security/links/0046351dae370ba775000000/Review-of-solutions-to-global-warming-air-pollution-and-energy-security.pdf.
- [3] 李书华. 电动汽车全生命周期分析及环境效益评价[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [4] 韩梓豪, 周胜, 秦旭映, 等. 中国核电的CO₂排放和放射性全生命周期分析[J]. 中国经贸导刊, 2021(20): 46-51.
- [5] 陈行. 基于煤电生命周期的电动汽车环境效益研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [6] JACOBSON M Z. 100% Clean, Renewable Energy and Storage for Everything[M]. Cambridge University press, 2020.
- [7] 李新航. 基于全生命周期的风电系统碳排放核算与分析[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(6): 5-8.
- [8] 宋海涛, 瞿慧红, 张泽民, 等. 从生命周期角度分析核电产生的碳排放[C]// 中国核学会2011年年会论文集. 中国核学会: 贵阳, 2011: 66-72.
- [9] IEA. 中国能源体系碳中和路线图 2021[EB/OL]. (2021-11)[2022-06-11]. <https://www.shangyexinzhi.com/article/4479611.html>.
- [10] 雷海涛. 中国制氢产业技术路径优化研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [11] 中国标准化研究院. 全国氢能标准化委员会2018中国氢能产业基础设施发展蓝皮书: 低碳低成本氢源的实现路径[M]. 北京: 中国质检出版社, 2018.
- [12] IEA. The_Future_of_Hydrogen[R/OL]. (2019-06)[2022-06-13]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf.
- [13] Technical Committee: ISO/TC 265. Carbon dioxide capture transportation and geological storage- Quantification and verification: ISO/TR 27915[S]. (2017-05)[2022-12-01]. <https://www.iso.org/standard/84578.html>.
- [14] 高炜, 白平, 王鸿, 等. CCUS项目的温室气体排放核算方法学思考[J]. 中国国土资源经济, 2022(4): 12-21.
- [15] 杨来, 王菊, 雷雪亚. 典型供氢路径下燃料电池汽车生命周期环境效益评估[J]. 汽车文摘, 2021(12): 1-7.
- [16] 杨裕生. “氢能是终极能源”命题不成立, 不要炒作和鼓噪[N]. 中国科学报, 2019-11-11(7).
- [17] 程冬茹. 汽柴油全生命周期碳排放计算[D]. 北京: 中国石油大学, 2016.
- [18] 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.

【作者简介】

段练: 工学学士, 高级工程师, 现就职于中国一汽, 主要研究方向为动力系统产品规划、策划和项目管理。

E-mail: duanlian@faw.com.cn

杜维明: 工学博士, 高级工程师, 现就职于中国一汽, 主要研究方向为动力总成规划、策划和项目管理。

E-mail: duweiming@faw.com.cn

王禄: 工学学士, 助理工程师, 现就职于中国一汽, 主要研究方向为电驱系统产品策划和项目管理。

E-mail: wanglu27@faw.com.cn