增程式电动汽车全生命周期节能减排绩效评价

马骊溟，许海波，陈轶嵩，刘佳慧

（长安大学汽车学院，西安 710064）

摘　要：采用全生命周期评价（LCA）一整套方法和理论，基于德国开发的生命周期评价专用软件 GABI，选取国内市场上某款增程式电动汽车，建立该车全生命周期评价模型，从而对增程式电动汽车的节能减排绩效进行研究。根据增程式电动汽车结构特点，将整车划分为发动机、发电机等 10 大部件，从原材料获取、制造装配、运行使用和报废回收 4 个阶段进行节能减排绩效研究。结果表明，原材料获取阶段矿产资源消耗最多，运行使用阶段化石能源消耗占比最高，而报废回收阶段均产生了明显的正效益。从提高增程式电动汽车能源转换效率，优化电能结构和建立完善的报废回收体系等方面提出建议，以达到增程式电动汽车节能减排的目的。

关键词：全生命周期评价；增程式电动汽车；GABI 软件；节能减排

中图分类号：U469.72　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2095-1469.2021.02.05

Evaluation of Energy Saving and Emission Reduction Over the Whole Life Cycle of an Extended Range Electric Vehicle

MA Liming，XU Haibo，CHEN Yisong，LIU Jiahui

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

Abstract: This paper adopted the life cycle assessment (LCA) method and GABI software, established a full LCA model and studied the energy saving and emission reduction performancefor an extended-range electric vehiclein the domestic market. According to the structural characteristics of the extended range electric vehicle, the whole vehicle was divided into 10 main components including engine and power battery. And then the energy saving and emission reduction performance was studied for four stages, i.e. the raw material acquisition stage, the manufacturing and assembly stage, the operation and use stage and the scrap recovery stage.The research results show that the raw material acquisition stage has the highest consumption of mineral resources, the operation and use stage has the highest consumption of fossil energy, and the significant benefits are generated in the scrap recovery stage. Finally suggestions are proposed on energy saving and emission reduction for extended range electric vehicles, including increasing the energy conversion efficiency, optimizing the power structure and improving the scrap recovery system.

Keywords: life cycle evaluation; extended range electric vehicle; GABI software; energy saving and emission reduction

收稿日期：2020-03-28　改稿日期：2020-04-22

基金项目：长安大学研究生科研创新实践项目（300103703027）

参考文献引用格式：

马骊溟，许海波，陈轶嵩，等 . 增程式电动汽车全生命周期节能减排绩效评价 [J]. 汽车工程学报，2021，11(2)：107-114.

MA Liming，XU Haibo，CHEN Yisong，et al. Evaluation of Energy Saving and Emission Reduction Over the Whole Life Cycle of an Extended Range Electric Vehicles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering，2021，11(2)：107-114.（in Chinese）

随着国家对生态文明建设和能源持续性发展的重视，新能源汽车正在快速发展。国务院办公厅发布的《关于加快新能源汽车推广应用的指导意见》，明确提出以纯电动汽车为新能源汽车的主要发展目标[1]。同时，新能源汽车技术路线也在快速发展，目前已形成多种技术路线并行发展的态势，而增程式电动汽车作为我国新能源汽车发展技术路线之一，也已经被纳入到了纯电动汽车的管理范畴。近期国家发改委发布的《汽车产业投资管理规定》也明确提出增程式电动汽车按照纯电动汽车进行管理[2]。因此，为了更好地实现我国能源战略和新能源汽车的可持续发展，对于增程式电动汽车节能减排绩效的研究也就很有必要。

近年来，国内外相关学者利用生命周期评价的方法对新能源汽车进行了广泛的研究。比如，SHARMA 等[3]对传统内燃机汽车、油电混合动力汽车和纯电动汽车三类乘用车进行了对比研究，并且评估了电力系统在减少环境排放方面的潜力。HOOFTMAN 等[4]分别研究了插电式混合动力汽车和纯电动汽车两者动力系统对环境的影响。EVANGELISTITI 等[5]对燃料电池汽车进行了全面的生命周期评估，并与纯电动汽车、传统内燃机汽车进行比较，对燃料电池汽车的关键部件进行敏感性分析。LEWIS 等[6]创建了传统内燃机汽车、油电混合动力汽车和插电式混合动力汽车生命周期评价模型，评估了三者节能减排的潜力和轻量化对于生命周期能耗和温室气体排放的影响。ONAT 等[7]对比分析了不同地区的纯电动汽车、插电式混合动力汽车、油电混合动力汽车和传统内燃机汽车。NOORI 等[8]对传统内燃机汽车、油电混合动力汽车、插电式混合动力汽车、增程式电动汽车和纯电动汽车 5 种车型的动力系统生命周期环境排放和成本进行分析和评估。FARIA 等[9]对传统内燃机汽车、插电式混合动力汽车以及纯电动汽车进行了环境和经济的生命周期评估（LCA），对具有代表性的紧凑型和微型车进行了实际测试。

国内方面，SHI Sainan 等[10]对传统内燃机汽车和纯电动汽车整车和燃料分别进行了全生命周期评估，并通过情景分析来评估不同政策的减排潜力。QIAO Qinyu 等[11]在分析纯电动汽车与传统内燃机汽车运行使用阶段差异的基础上，研究了纯电动汽车生产阶段温室气体的排放量，并将结果与传统内燃机汽车进行比较。HAO Han 等[12]针对纯电动汽车在中国的环境下是否有助于减少温室气体排放，分别对传统内燃机汽车、油电混合动力汽车、纯电动汽车生命周期的成本和温室气体排放进行研究，并比较它们在减少温室气体排放方面的成本效益。HU Zhiyuan 等[13]利用生命周期评价（LCA）方法对我国生物乙醇混合燃料汽车进行了评价。PENG Tianduo 等[14]提出了一种纯电动汽车全生命周期分析模型，考虑了电网结构和车辆能效表现的变化，分析纯电动汽车的生命周期能耗和温室气体排放。XIONG Siqin 等[15]比较了纯电动汽车和插电式混合动力汽车的生命周期能耗和温室气体排放，此外，对电网结构、车辆行驶里程等影响因子进行了敏感性分析。

综上所述，在新能源汽车全生命周期评价领域，国内外学者均做了大量的研究。经过总结发现，研究主要集中于纯电动汽车和传统内燃机汽车，其次是油电混合动力汽车、插电式混合动力汽车和燃料电池汽车，而对于增程式电动汽车的研究较为缺乏。因此，本文将对其进行系统化、全面化的节能减排评价，以期完善我国新能源汽车生命周期评价体系。同时，评价结果可为新能源汽车企业和相关研究机构提供数据支持，还可为增程式电动汽车的发展和推广提供参考依据。

1 研究对象与数据来源

本文在进行生命周期评价时，根据国内外现有在售的增程式电动车型，结合相关文献资料的调研和查找，以及综合考虑车型数据的完善程度和准确度，选取国内市场上的增程式电动汽车作为具体研究对象，车型具体参数见表 1。文中相关数据来源于 GABI 软件自带数据库、现有的期刊和文献、相关车型的官网数据和实地调研。

表 1　车型相关参数

名称	参数
车身尺寸（长 × 宽 × 高）/mm	5 020×1 960×1 760
整备质量 *m*/kg	2 300
燃油标号	95 号
油箱容积 /L	45
轴距 /mm	2 935
发动机排量 /L	1.2
发动机最大功率 P_{max}/kw	96
电池类型	磷酸铁锂电池
电池能量 *E*/kWh	40.5
快充电量 /%	80
电机类型	永磁 / 同步
电机总功率 P_m/kW	240
NEDC 综合工况总续航里程 *s*/km	800
市区工况油耗 /(L·100 km^{-1})	5
百公里耗电量 /kWh	20.6

2　系统边界与部件划分

本文在进行整车全生命周期节能减排分析时，首先设定整车功能单位为全生命周期内正常行驶 15 万 km 或整车使用寿命为 15 年。其次，将整车的全生命周期划分为 4 个阶段：原材料获取阶段、制造装配阶段、运行使用阶段和报废回收阶段。最后在对部件进行划分时，将整车分为 10 大主要零部件，分别为：发动机、发电机、动力电池、驱动电机、电控装置、变速器、铅酸电池、车身、底盘、流体与液体，对于部分质量较小，对结果影响程度不大的零部件本文不予考虑。最终的系统边界图如图 1 所示。

3　清单分析与模型建立

生命周期清单分析（Life Cycle Inventory Analysis，LCI）是对“摇篮到再生”的整个生命周期中的废物排放和资源消耗等进行量化的过程[16]，是产品生命周期评价最关键的环节之一，数据的准确程度将直接影响最终的评价结果。在进行清单分析的过程中，部分零部件数据较难获取，对结果有影响的采用近似替代的方法，而部分对结果影响不大的零部件数据本文暂不考虑。各部件上游原材料的消耗及制造装配的能耗数据见表 2，此外，在建模时，分别针对 4 个阶段的能源消耗和环境排放建立模型，如下所示。

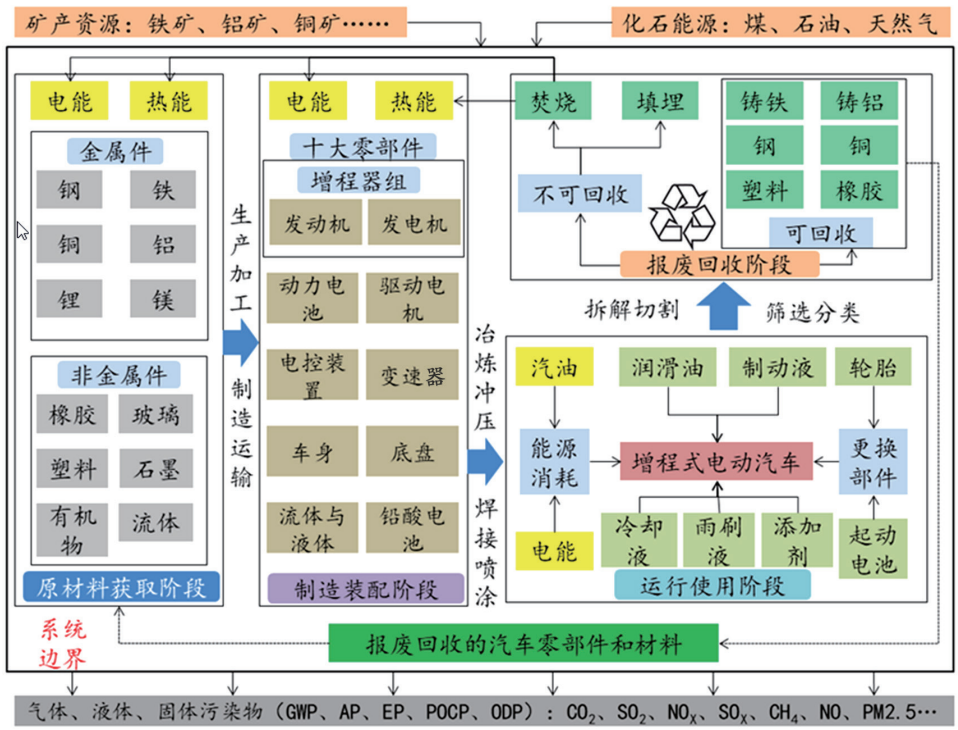

图 1　系统边界图

表 2 主要零部件能耗、质量参数

参数		值
发动机	钢 /kg	45.32
	铸铁 /kg	20.92
	铸铝 / kg	69.72
	铜 /kg	2.16
	不锈钢 /kg	13.94
	塑料 /kg	6.97
	橡胶 /kg	6.97
	电能 /kWh	504.5
车身	钢 /kg	666.39
	铸铝 /kg	7.47
	铜 /kg	18.72
	镁 / kg	0.388
	玻璃 /kg	64.21
	塑料 / kg	168.78
	橡胶 /kg	4.95
	其他 /kg	39.092
	电能 /kWh	3 687.59
	工艺用水 /kg	110.4
发电机	钢 /kg	17.33
	铸铝 /kg	17.33
	铜 /kg	13.10
	电能 /kWh	234.8
	热能 /MJ	62.8
底盘	钢 /kg	482.51
	铸铝 /kg	5.52
	铸铁 /kg	37.10
	铜 /kg	13.32
	塑料 /kg	19.55
	橡胶 /kg	24.36
	其他 /kg	4.64
	电能 /kWh	472.86
	热能 /MJ	213.11
磷酸铁锂电池	磷酸铁锂（$LiFePO_4$）/kg	51.04
	聚偏氟氟乙烯（PVDF）/kg	4.64
	N- 甲基吡咯烷酮（NMP）/kg	11.6
	六氟酸铁锂（$LiPF_6$）/kg	4.64
	碳酸乙烯酯（EC）/kg	9.28
	二甲基酸酯（DMC）/kg	9.28
	聚丙烯（PP）/kg	13.92
	聚乙烯（PE）/kg	4.64
	铝基体 /kg	30.16
	石墨 /kg	23.2
	铝箔 /kg	64.96
	晶体管 /kg	2.16
	电阻器 /kg	2.16
	电能 /kWh	3 333.8
	天然气 /m³	204.2
启动电池	铅 /kg	6.9
	硫酸 /kg	0.79
	聚丙烯 /kg	0.61
	玻璃纤维 /kg	0.21
	水 /kg	1.41
	电耗 /kWh	143.69
电动机	钢 /kg	23.97
	铸铝 /kg	37.13
	铜 /kg	14.76
	电能 /kWh	446.87
	热能 /MJ	170.85
主减速器	钢 /kg	44.77
	铸铝 /kg	14.8
	铜 /kg	14.06
	塑料 /kg	0.148
	有机物 /kg	0.222
	有机物 /kg	144.09
	热能 /MJ	274.08
	柴油 /kg	2.07
电控装置	钢 /kg	4.35
	铸铝 /kg	40.89
	铜 /kg	7.13
	塑料 /kg	20.71
	橡胶 /kg	3.22
	有机物 /kg	10.7
	电能 /kWh	124.4
流体	润滑油 /kg	4.68
	制动液 /kg	0.91
	冷却液 /kg	10.4
	雨刷液 /kg	2.71
	添加剂 /kg	13.6
	电能 /kWh	2 119

3.1 整车全生命周期阶段

$$E_{LCA} = E_{Rmas} + E_{Mfas} + E_{Rups} + E_{Srps}。 \quad (1)$$

$$P_{LCA} = P_{Rmas} + P_{Mfas} + P_{Rups} + P_{Srps}。 \quad (2)$$

式中：E_{LCA}，P_{LCA} 分别为整车全生命周期阶段的总能源消耗和总环境排放；E_{Rmas}，P_{Rmas} 分别为原材料获取阶段所对应的能源消耗和环境排放；E_{Mfas}，P_{Mfas} 分别为制造装配阶段所对应的能源消耗和环境排放；E_{Rups}，P_{Rups} 分别为运行使用阶段所对应的能源消耗和环境排放；E_{Srps}，P_{Srps} 分别为报废回收阶段所对应的能源消耗和环境排放。

3.2 原材料获取阶段

$$E_{Rmas} = \sum_{k=1}^{10} M_{kj} \times Q_{jr}。 \quad (3)$$

$$P_{\text{Rmas}}=\sum_{k=1}^{10}M_{kj}\times W_{jr}\ 。\tag{4}$$

式中：k 表示对应的零部件种类；M_{kj} 表示第 k 种部件所需要的第 j 种原材料数量；Q_{jr} 表示第 j 种单位质量原材料获取所消耗的第 r 种能源；W_{jr} 表示第 j 种单位质量原材料获取产生的第 r 类环境排放量。

3.3 制造装配阶段

$$E_{\text{Mfas}}=\sum_{k=1}^{10}M_{kn}\times Q_{nr}\ 。\tag{5}$$

$$P_{\text{Mfas}}=\sum_{k=1}^{10}M_{kn}\times W_{nr}\ 。\tag{6}$$

式中：M_{kn} 表示部件 k 所需要的第 n 种零件质量；Q_{nr} 表示单位质量第 n 种零件制造过程所需要的第 r 种能源；W_{nr} 表示第 n 种零件制造过程中产生的第 r 类环境排放量。

3.4 运行使用阶段

$$E_{\text{Rups}}=\sum_{f}\left(M_{\text{use}}\times Q_{\text{use}}\right)。\tag{7}$$

$$P_{\text{Rups}}=\sum_{f}\left(M_{\text{use}}\times W_{\text{use}}\right)。\tag{8}$$

式中：f 表示所需要更换的零部件；M_{use} 表示运行使用过程中所需要更换的零部件质量；Q_{use} 表示运行使用过程中更换零部件所需的能源消耗量；W_{use} 表示运行使用过程中更换零部件所对应的环境排放量。

在 NEDC 综合工况下该车续驶里程为 800 km，根据官方给出的纯电续驶里程为 180 km，确定纯电行驶里程占比为 22.5%。假设全生命周期行驶里程为 150 000 km，得纯电行驶里程为 33 750 km，增程及燃油行驶里程为 116 250 km。综合考虑电池充 / 放电效率为 90%、80%，整车油耗计算时，综合考虑能源转换损失和热量损失，设其燃油利用率为 30%，得到总油 / 电耗见表 3。

表 3　金属材料回收步骤及回收率

能源消耗类型	百公里油耗 / 电耗	总油耗 / 电耗
油耗 /L	5	7 556.2
电耗 /kWh	20.6	9 656.2

3.5 报废回收阶段

$$E_{\text{Srps}}=\sum_{T}\left(M_{\text{s}}\times Q_{\text{s1}}-M_{\text{s}}\times Q_{\text{s2}}\right)。\tag{9}$$

$$P_{\text{Srps}}=\sum_{T}\left(M_{\text{s}}\times W_{\text{s1}}-M_{\text{s}}\times W_{\text{s2}}\right)。\tag{10}$$

式中：T 表示回收的零部件；M_{s} 表示对应回收部件的质量；Q_{s1} 表示回收部件所消耗的能源；Q_{s2} 表示回收部件所产生的能源回收量；W_{s1} 表示回收部件所产生的环境排放量；W_{s1} 表示回收部件所产生的环境效益。

在报废回收过程中，由于车体组成结构复杂，各部件材料回收工艺差异较大，为方便研究，本文主要考虑 4 种主要金属材料的回收利用，其余废弃材料则采用 GABI 软件对应工艺进行处理，各金属回收过程及回收率见表 4，回收每千克金属所消耗的能源见表 5。

表 4　金属材料回收步骤及回收率

金属材料	回收步骤	回收率 /%
钢	废料—电弧炉（EAF）	90
铁	废料—冲天炉—磨具冷却	80
铜	废料—铜电解	90
铝	废料—融化—铝锭铸造	92

表 5　回收每千克金属所消耗的能源

能源	钢材	铝材	铸铁	铜材
煤 /kg	–	–	0.313	–
柴油 /kg	–	3.08×10^{-5}	–	–
汽油 /kg	–	4.85×10^{-5}	–	–
天然气 /m^3	0.006 6	0.047	–	–
电力 /kWh	1.176	0.221 1	0.622	2.65

4 影响评价与结果解释

产品生命周期影响评价（Life Cycle Impact Assessment，LCIA）是对清单分析中的环境影响类型进行定量或定性的综合评价与描述。SETAC、ISO 和英国环保局都倾向于把影响评价定为一个三步走模型，分别是：分类与特征化、归一化、量化 [17]。本文根据本土化数据情况与中国国情相结合，选取 CML2001 方法进行环境影响评价，能源消耗主要考虑矿产资源消耗（ADPe）和化石能源消耗（ADPf），将环境影响划分为 5 类，分别是：全球变暖（GWP）、酸化（AP）、水体富营养化（EP）、光化学烟雾（POCP）和臭氧层损耗（ODP）。环境影响评价的计算过程经查阅文献 [18] 所得：

$$IA_{(\omega,r)}=\sum_{i}m_{i,r}\times f_{i,w}\ 。\tag{11}$$

式中：$IA_{(\omega,r)}$ 为 ω 类环境影响潜值（kg-Eq）；$m_{i,r}$ 为 ω 类环境影响起促成作用的第 i 类资源、排放或能

源（kg or MJ）；$f_{i,w}$ 为第 i 类资源、排放或能源的特征化因子（kg−Eq/kg or kg−Eq/MJ）。

分类与特征化是在清单分析的基础上，将所得到的数据根据标准划分到不同的影响类别，并基于 GABI 软件及特征化计算方法，得到增程式电动汽车资源环境特征化结果，见表 6。

归一化主要是为了更直观地显示增程式电动汽车生命周期各阶段对环境造成的影响，并得出对比分析结论，本文参考 CML2001 评价方法的归一化基准值进行计算，得出环境影响归一化结果，相关归一化基准值以及权重系数 [19] 见表 7，最终得到可统一对比的环境影响综合值，见表 8。

表 6 全生命周期各阶段特征化结果

	ADP (e) (kgSb−Eq)	ADP (f) (MJ)	GWP (kg CO_2−Eq)	AP (kg SO_2−Eq)	EP (kg Ehosphate−Eq)	POCP (kg Ethene−Eq)	ODP (kg R11−Eq)
原材料获取阶段	4.05×10^{-1}	6.88×10^{4}	5.74×10^{3}	2.46×10	1.69	1.75	1.11×10^{-10}
制造装配阶段	5.39×10^{-4}	9.77×10^{4}	9.24×10^{3}	3.75×10	2.73	3.58	2.98×10^{-11}
运行使用阶段	1.05×10^{-1}	3.20×10^{5}	9.61×10^{3}	4.47×10	3.67	4.52	2.69×10^{-11}
报废回收阶段	-3.37×10^{-1}	-3.72×10^{4}	-2.78×10^{3}	−9.20	-6.63×10^{-1}	-5.68×10^{-1}	-8.60×10^{-11}
全生命周期阶段	1.73×10^{-1}	4.49×10^{5}	2.18×10^{4}	9.77×10	7.43	9.28	8.16×10^{-11}

表 7 归一化基准值与权重系数

环境影响类型	归一化基准值	权重（无量纲）
全球变暖潜值（GWP）	4.18×1013 kg CO_2−Eq	0.274 692 29
酸化潜值（AP）	2.39×1011 kg SO_2−Eq	0.180 726 51
水体富营养化潜值（EP）	1.58×1011kg Phosphate−Eq	0.088 862 2
光化学烟雾潜值（POCP）	3.68×1010 kg Ethene−Eq	0.181 026 72
臭氧层损耗潜值（ODP）	2.27×108 kg CFC −Eq	0.274 692 29

表 8 全生命周期环境影响归一化结果

	GWP (kg CO_2−Eq)	AP (kg SO_2−Eq)	EP (kg Phosphate−Eq)	POCP (kg Ethene−Eq)	ODP (kg R11−Eq)
原材料获取阶段	1.36×10^{-10}	1.03×10^{-10}	1.07×10^{-11}	4.76×10^{-11}	4.89×10^{-19}
制造装配阶段	2.19×10^{-10}	1.57×10^{-10}	1.73×10^{-11}	9.72×10^{-11}	1.31×10^{-19}
运行使用阶段	2.28×10^{-10}	1.87×10^{-10}	2.32×10^{-11}	1.23×10^{-10}	1.19×10^{-19}
报废回收阶段	-6.58×10^{-11}	-3.85×10^{-11}	-4.20×10^{-12}	-1.54×10^{-11}	-3.79×10^{-19}
全生命周期阶段	5.17×10^{-10}	4.09×10^{-10}	4.70×10^{-11}	2.52×10^{-10}	3.60×10^{-19}

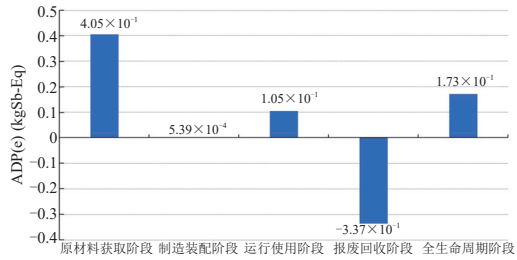

图 2 全生命周期阶段矿产资源消耗

由图 2 可知，在全生命周期 4 个阶段中，原材料获取阶段矿产资源消耗最多，数值为 0.040 5 kg Sb−Eq，主要是因为车身、底盘、动力电池、发动机等零部件需要大量的钢、铁、铝和铜等矿产资源；制造装配阶段只有少量的矿产资源消耗；运行使用阶段由于轮胎、启动电池等零部件的更换也会产生一定的矿产资源消耗；报废回收阶段值为 −0.037 kg Sb−Eq，表明报废回收阶段对于资源的消耗产生了正效益，最后全生命周期阶段总的矿产资源消耗为 0.173 kg Sb−Eq。

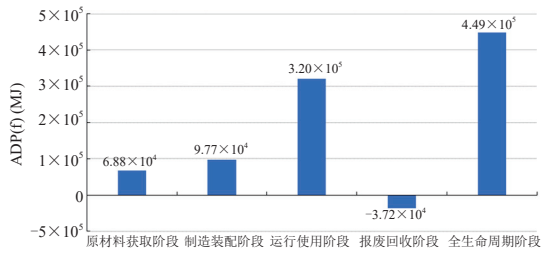

图 3 全生命周期阶段化石能源消耗

由图 3 可知，在全生命周期 4 个阶段中，运行使用阶段化石能源消耗最多，占全生命周期的 71.3%，主要是因为增程式电动汽车在运行使用时需要同时消耗汽油和电能，但我国电能的主要来源依旧是煤炭发电，从而造成了化石燃料的间接消耗。原材料获取阶段和制造装配阶段也伴随着一定的化石能源消耗，主要是因为在生产和制造时需要消耗一定的电能和热能。在报废回收阶段化石能源的消耗为负值，表明通过对汽车材料的回收以及焚烧处理，部分塑料件产生的电能和热能能够降低一定的化石能源消耗。

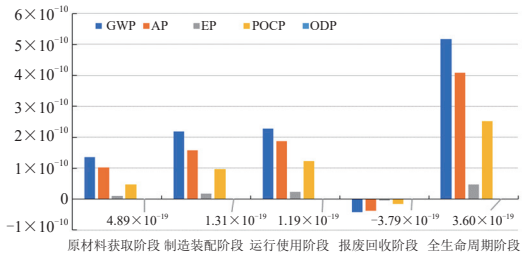

图 4　全生命周期阶分阶段、分类别环境影响大小

由表 5 和图 4 综合分析可知，从全生命周期 4 个阶段来看，对环境的影响由大到小依次为：运行使用阶段占比最大 (45.61%)，主要是因为增程式电动汽车在此阶段消耗了大量的汽油和电能，而汽油燃烧过程中产生的硫化物、氮化物以及温室气体等直接排放到空气中，对环境造成影响，加之我国电能结构以火力发电为主 (比例接近 73%)，火力发电所燃烧的大量煤炭更加剧了对环境的影响，其次是制造装配阶段 (39.92%) 和原材料获取阶段 (24.15%)、而报废回收阶段占比为 -10.08%，对环境影响产生了正效益。从五类环境影响值来看，由大到小的顺序依次为：GWP ＞ AP ＞ POCP ＞ EP ＞ ODP，其中对环境影响最大的是 GWP，占比为 42.03%，其他依次占比为 AP(33.25%)、POCP(20.49%)、EP(3.82%)、ODP(0.41%)。

5　研究总结与改进建议

本文以全生命周期评价理论为基础，选取增程式电动汽车为具体研究对象，探究增程式电动汽车全生命周期阶段的节能减排效果，研究结果表明：（1）在矿产资源 ADP（e）消耗方面，原材料获取阶段消耗量最大。(2) 在化石能源消耗 ADP（f）方面，运行使用阶段占比 (71.3%) 最大；(3) 在环境影响方面，运行使用阶段环境影响占比 (45.61%) 最大，在五类环境影响中，全球变暖 GWP 占比 (42.03%) 最大。(4) 在能源消耗和环境影响两个方面，报废回收阶段均能产生明显的正效益。结合以上研究结果提出以下建议：

（1）在原材料生产制造阶段，提高我国钢、铁、铜等矿产资源生产加工工艺以及生产效率，寻求新材料和新生产工艺以期减少矿产资源的消耗，另一方面也可从汽车设计入手，采用轻量化技术，尽量降低汽车整备质量，从而降低金属等矿产资源的消耗。

（2）在运行使用阶段，提高发动机燃油利用效率，减少汽油等化石能源的消耗，同时研发专门适用于增程式电动汽车的能量管理策略，提高整车能源转换效率，从而降低能源消耗。同时也可以提升电池的充电和发电效率，延长使用寿命，使电能得到充分利用，降低电能消耗，减少因发电造成的化石燃料消耗。

（3）在报废回收阶段，由于此阶段在减少能源消耗和环境影响方面均产生了明显的正效益，因此，建立完善的电动汽车报废回收体系、加强金属部件的回收、改善回收工艺等，对于减少能源消耗和环境影响具有很强的现实意义。

（4）改善我国电网结构，尽量降低煤炭发电比例的同时提高我国煤炭发电的效率，以降低化石燃料的消耗，并加快其他清洁能源发电技术的研究，提高风能、水能、太阳能等清洁能源发电占比和效率。

参考文献 (References)

[1] 国务院办公厅 . 关于加快新能源汽车推广应用的指导意见 [J]. 综合运输，2014(8)：82-85.
General Office of the State Council. Guiding Opinions on Accelerating the Promotion and Application of New Energy Vehicles [J].Comprehensive Transportation，2014(8)：82-85.(in Chinese)

[2] 刘金周，吴征，李永康 . 增程式电动汽车技术路线浅析 [J]. 汽车文摘，2019(7)：52-55.

LIU Jinzhou，WU Zheng，LI Yongkang.Analysis of the Technical Route of Extended-Range Electric Vehicles[J]. Automotive Digest，2019(7)：52-55.(in Chinese)

[3] SHARMA R，MANZIE C，BESSEDE M，et al. Conventional，Hybrid and Electric Vehicles for Australian Driving Conditions. Part 2：Life Cycle CO_2-e Emissions[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2013，28：63-73.

[4] HOOFTMAN N，MESSAGIE M，JOINT F，et al. In-Life Range Modularity for Electric Vehicles：the Environmental Impact of a Range-Extender Trailer System [J]. Science，2018，8(7)：1016.

[5] EVANGELISTI S，TAGLIAFERRI C，BRETT D J L，et al. Life Cycle Assessment of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell System for Passenger Vehicles[J]. Journal of Cleaner Production，2017，142：4339-4355.

[6] LEWIS A M，KELLY J C，KEOLEIAN G A. Vehicle Lightweighting vs. Electrification：Life Cycle Energy and GHG Emissions Results for Diverse Powertrain Vehicles[J]. Applied Energy，2014，126：13-20.

[7] ONAT N C，KUCUKVAR M，TATARI O. Conventional，Hybrid，Plug-in Hybrid or Electric Vehicles State-Based Comparative Carbon and Energy Footprint Analysis in the United States[J]. Applied Energy，2015，150：36-49.

[8] NOORI M，GARDNER S，TATARI O. Electric Vehicle Cost，Emissions，and Water Footprint in the United States：Development of a Regional Optimization Model [J]. Energy，2015，89：610-625.

[9] FARIA R，MARQUES P，MOURA P，et al. Impact of the Electricity Mix and Use Profile in the Life-Cycle Assessment of Electric Vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2013，24：271-287.

[10] SHI Sainan，ZHANG Haoran，YANG Wen，et al.A Life-Cycle Assessment of Battery Electric and Internal Combustion Engine Vehicles：A Case in Hebei Province， China[J]. Journal of Cleaner Production，2019，228：606-618.

[11] QIAO Qinyu，ZHAO Fuquan，LIU Zongwei，et al. Comparative Study on Life Cycle CO_2 Emissions from the Production of Electric and Conventional Vehicles in China [J]. Energy Procedia，2017，105：3584-3595.

[12] HAO Han，CHENG Xiang，LIU Zongwei，et al. Electric Vehicles for Greenhouse Gas Reduction in China：A Cost-Effectiveness Analysis[J]. Transportation Research Part D，2017，56：68-84.

[13] HU Zhiyuan，PU Gengqiang，FANG Fang，et al. Economics，Environmentand Energy Life Cycle Assessment of Automobiles Fueled by Bio-Ethanol Blends in China[J]. Renewable Energy，2004，29(14)：2183-2192.

[14] PENG Tianduo，OU Xunmin，YAN Xiaoyu. Development and Application of an Electric Vehicles Life-Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions Analysis Model[J]. Chemical Engineering Research and Design，2018，131：699-708.

[15] XIONG Siqin，JI Junping，MA Xiaoming. Comparative Life Cycle Energy and GHG Emission Analysis for BEVs and PhEVs：A Case Study in China[J]. Energy Weekly News，2019，12(5)：834.

[16] 郭焱，刘红超，郭彬 . 产品生命周期评价关键问题研究评述 [J]. 计算机集成制造系统，2014，20(5)：1141-1148.
GUO Yan，LIU Hongchao，GUO Bin.Review of Research on Key Issues of Product Life Cycle Assessment[J]. Computer Integrated Manufacturing System，2014，20(5)：1141-1148.(in Chinese)

[17] HEIJUNGS R，GOEDKOOP M，STRUIJS J，et al. Towards a Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Category Indictors at the Midpoint and the Endpoint Level. Report of the first Project Phase：Design of the New Method [R]. VROM，s-Gravenhage，2003.

[18] GUINEE J B.Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards[J].International Journal of Life Cycle Assessment，2002，7(5)：311-313.

[19] 陈轶嵩 . 汽车零部件全生命周期生态效益评价研究 [D]. 长沙：湖南大学，2014.
CHEN Yisong. Research on Ecological Benefit Evaluation of Auto Parts' Whole Life Cycle[D]. Changsha：Hunan University， 2014.(in Chinese)

作者介绍

责任作者：马骊溟 (1971-)，女，黑龙江绥化人，博士，副教授，主要研究方向为优化设计与制造。

Tel：13709188333

E-mail：452728565@qq.com

通信作者：陈轶嵩 (1988-)，男，陕西周至人，博士，副教授，主要研究方向为新能源汽车全生命周期评价与汽车产业规划。

Tel：17791263276

E-mail：chenyisong_1988@163.com