

中国汽车低碳化系统工程研究

张晓艳, 王永军, 李骏, 付磊

(中国第一汽车股份有限公司, 长春 130011)

摘要: 中国已经签署《巴黎协定》并做出 CO₂ 减排承诺, 中国汽车工业应该为实现中国低碳化作贡献。本文从中国汽车低碳化系统构架、生命周期碳排放现状和 2030 年中国汽车销量预测三个角度出发, 构建了汽车 CO₂ 排放预测模型, 分析了中国汽车碳排放构成, 进行了至 2030 年汽车碳排放总量预测, 预测结果显示, 中国汽车碳排放总量在 2025—2030 年达到峰值。本研究建立了汽车低碳化评价体系, 并提出了中国汽车低碳化技术路线的建议。

关键词: 低碳化; 油耗法规; 汽车技术; 生命周期; 技术路线

中图分类号: U461 **文献标识码:** A

Low Carbonization System Engineering for Automobiles in China

Zhang Xiaoyan, Wang Yongjun, Li Jun, Fu Lei

(China FAW Corporation Limited, Changchun 130011, China)

Abstract: To realize the commitment toward reducing CO₂ emission made in the Paris Agreement, the automotive industry in China must lower its CO₂ emission and contribute toward low carbonization. We have created a prediction model for CO₂ emission from automobiles based on the architecture of low carbonization systems for automobiles, current emission situation within the automobile life cycle, and the sales prediction for 2030 in China. Using this model, the total CO₂ emission of automobiles in China was predicted for 2030; we also analyzed the CO₂ emission of the automobiles with respect to the total amount of CO₂ emission in China. An evaluation system has also been set up for low CO₂ emission from automobiles in China, and comprehensive suggestions for a low-carbon technology roadmap in China are also presented in this paper.

Keywords: low carbonization; fuel consumption regulation; automobile technology; life cycle; technology roadmap

一、前言

低碳化是中国发展国民经济、制定国家战略的重要原则之一, 未来中国汽车工业发展最大的挑战是 CO₂。政府间气候变化专门委员会研究报告表明, 要控制全球气温升高不能超过 2℃, 就必须把 CO₂

排放量控制在 3.15×10^{12} t。现在全世界已经排放了 2×10^{12} t。为此, 包括中国在内的 195 个国家签订《巴黎协定》。中国在《巴黎协定》中承诺, 到 2030 年 CO₂ 排放达到峰值, 单位 GDP CO₂ 排放比 2005 年降低 60%~65%。中国汽车产业可持续发展战略的制定必须考虑低碳化的挑战, 在中国汽车工业向

收稿日期: 2018-02-05; 修回日期: 2018-02-11

通讯作者: 张晓艳, 中国第一汽车股份有限公司, 高级工程师, 研究方向为汽车产业战略; E-mail: zhangxiaoyan1@faw.com.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国汽车低碳化系统工程研究”(2016-XY-02)

本刊网址: www.enginsci.cn

着节能减排转型阶段具有重要的指导意义 [1], 在 CO₂ 总量控制的前提下, 研究中国汽车低碳化发展具有重大意义 [2]。从汽车产业全生命周期角度系统地研究低碳化之路是本项研究的基本目的, 汽车全产业链, 即研发、制造生产、销售使用和回收, 均涉及和影响原材料、机械、电子、能源、金融、服务以及基础建设等各个领域。

二、中国低碳化系统工程研究

汽车低碳化系统工程研究从六个方面开展, 即汽车低碳化系统架构、汽车 CO₂ 排放现状、汽车 CO₂ 排放预测模型、汽车 CO₂ 排放总量预测、汽车 CO₂ 排放占整个国家 CO₂ 排放的比例, 以及汽车 CO₂ 排放评价。

低碳化系统构建包括能源开采、能源加工、能源运输, 汽车材料制造、汽车生产、汽车使用和汽车废弃回收环节。

根据国家统计局统计数据进行分析, 2015 年中国汽车 CO₂ 排放统计数据见图 1, 其中使用环节占整体 CO₂ 排放的 75%, 材料生产占 16%, 车辆生产占 6%, 维护保养占 1%, 废弃回收占 2%。发达国家汽车使用环节 CO₂ 排在整体排放的比例为 60% 左右。从整体上看, 从油井到车轮, 我国全过程 CO₂ 排放强度普遍都比发达国家高。

在使用环节, 2000 年中国汽车 CO₂ 排放量为 3.2×10⁸ t, 2008 年为 6.1×10⁸ t, 2015 年则增加到

了 8.6×10⁸ t, 我国汽车工业碳排放快速增加 [3], 而日本 2000 年汽车 CO₂ 排放量为 2.37×10⁸ t [4], 2008 年为 2.23×10⁸ t, 2014 年为 2.01×10⁸ t, 日本汽车 CO₂ 排放量呈逐年递减的趋势。

从日本汽车使用环节的碳排放看, 总量已处于稳定并因技术进步呈下降趋势, 而中国汽车使用碳排放随汽车保有量的增加呈现快速增加趋势。在制造环节, 中国汽车制造环节 CO₂ 排放量大, 目前中国汽车制造碳排放增加已放缓。日本 2013 年汽车产量是中国的 1/2, 但汽车制造碳排放是中国的 1/9 [5]。国外汽车公司的单车生产碳排放可低至 0.7 t/辆左右, 中国汽车制造环节 CO₂ 排放量虽逐年下降, 但仍有 2.9 t/辆左右, 减排空间较大。在汽车单车材料制造方面, 中国汽车材料制造环节 CO₂ 排放量比美国高, 其中中国单车钢铁的制造环节 CO₂ 排放量为 3.27 t, 而美国为 2.49 t, 中国汽车铝制造环节 CO₂ 排放量为 1.46 t, 而美国仅为 0.28 t。

本文基于汽车全生命周期, 分别建立汽车使用(包括燃料制造环节碳排放)、生产、材料、维护、回收环节的碳排放计算模型, 其中:

$$M_{co_2_tot} = M_{co_2_road} + M_{co_2_Manuf} + M_{co_2_Maint} + M_{co_2_Dis} + M_{co_2_mat}$$

式中, $M_{co_2_tot}$ 为汽车相关碳排放总量; $M_{co_2_road}$ 为汽车使用环节碳排放总量; $M_{co_2_Manuf}$ 为汽车制造环节碳排放总量; $M_{co_2_Maint}$ 为汽车维护过程碳排放总量; $M_{co_2_Dis}$ 为汽车废弃过程碳排放总量; $M_{co_2_mat}$ 为汽车制造用材料生产过程产生的碳排放总量。

汽车全生命周期 CO₂ 排放为道路使用排放, 生产制造环节排放, 维修保养环节排放, 处置和回收排放及材料生产过程中 CO₂ 排放量的总和。

$$M_{co_2_road} = \sum G_r \times A_k / A_r \times e_k \times m_k \times e_t \times C_k \times l_k$$

式中, G_r 为参考年份燃料消耗总量, 即已知年份的燃料消耗总量; A_k 为未来车辆保有量, 即预测年份车辆保有量; A_r 为参考车辆保有量, 即已知年份车辆保有量; m_k 为年平均使用里程修正系数; e_k 为未来年份保有车辆油耗修正系数; e_t 为交通效率影响系数; C_k 为单位质量燃料 CO₂ 排放系数; l_k 为生命周期 CO₂ 排放系数。

模型中采用基于年度燃料消耗总量, 利用工况油耗的进行修正的方法, 规避了实际油耗值无法统

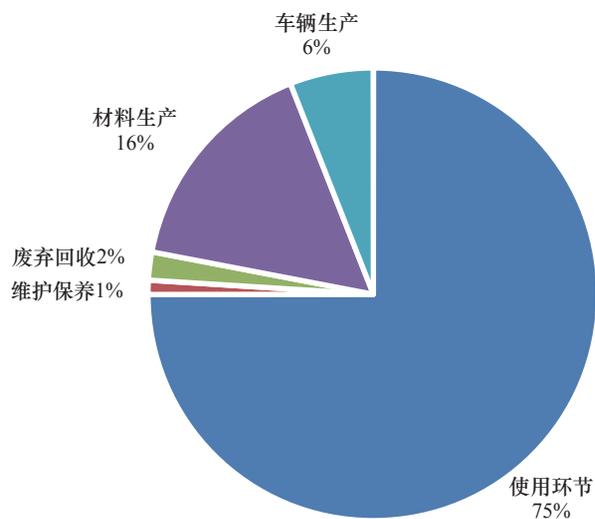


图 1 中国汽车 2015 年 CO₂ 排放统计分析

计, 工况油耗与实际油耗不符等问题。生产制造环节 CO₂ 排放总量

$$M_{CO_2_Manuf} = M_{quantity} \times C_{CO_2_quantity}$$

式中, $M_{quantity}$ 为汽车年产量; $C_{CO_2_quantity}$ 为平均单位汽车生产碳排放量。

参考国外汽油发动机汽车全生命周期 CO₂ 排放比例。根据各个环节特征, 做如下假设:

汽车维护环节 CO₂ 排放与使用环节 CO₂ 排放比例为: 0.008:0.769;

材料生产与车辆生产 CO₂ 排放比例为: 0.131:0.068;

废弃回收与使用环节 CO₂ 排放比例为: 0.022:0.769。

模型的输入为预测的 2020 年、2025 年和 2030 年我国汽车产销规模达 3 000 万、3 500 万和 3 800 万辆, 《节能与新能源汽车路线图》中汽车制造能耗降低目标, 即 2020 年、2025 年和 2030 年单位生产总值能耗比 2015 年分别降低 20%、35% 和 50%。根据上述模型、输入和假设条件对中国汽车 CO₂ 排放进行了预测, 结果表明, 无论汽车使用环节还是全生命周期, 2030 年都会有较大降幅 (见图 2), 提前实现“达峰”, 中国汽车制造环节 CO₂ 排放量从目前开始呈现下降趋势, 但是下降幅度和贡献度最大的是汽车使用环节。汽车制造环节碳排放降低得益于汽车产业的节能减排力度加大, 使用环节碳排放幅度的下降主要归结为两方面原因, 第一是汽车油耗和电耗在法规的要求下持续下降, 第二是到 2025 年以后, 汽车年产销量、年报废量、汽车保有

量等趋向稳定。如果不能把使用环节中的 CO₂ 控制下来, 要持续保持到 2030 年整车的销售量继续提升, 将会困难重重。

图 3 和图 4 分别是全球道路运输产生碳排在总量中的占比 [6], 和中国道路运输产生碳排在总量中的占比。全球道路运输 CO₂ 排放量平均占总量的 17% 左右, 而中国 2005 年占 4.6%, 2010 年占 5.3%, 2015 年则增加到了 7.0%。由于我国碳排放基数大, 虽然 CO₂ 占比不大, 但是占比增长迅速, 2005—2015 年增长较为明显, 汽车 CO₂ 排放总量巨大。

本文从汽车低碳化系统工程角度, 建立了包含 7 项一级指标和 32 项二级指标的汽车低碳化评价体系。一级指标包括产业低碳化、产品低碳化、能源低碳化、基础设施低碳化、出行低碳化、政策环境低碳化和文化低碳化, 如图 5 所示。

通过设计各级指标的权重并进行专家打分, 得到综合评价结果, 总体评价结果表明, 在汽车低碳化国家整体发展水平上, 日本和德国的分数领先, 中国与发达国家还有明显差距, 从评价结果可以看出, 日本和德国超过 8.5 分, 位于低碳化的第一阵营; 我国低于 7 分, 为第三阵营。我国除了政策环境低碳化之外, 其余分数都较低。《巴黎协定》后主要国家都进行碳排放控制测算, 为满足生态发展需求, 一些国家已提出 2030 年左右停售纯燃油车; 研究显示, 中国汽车有望在 2028 年 CO₂ 排放总量提前达到峰值, 总碳排放量要控制在 1.5×10^9 t, 汽车碳排放占国家总的碳排放的比例大致在 12%。

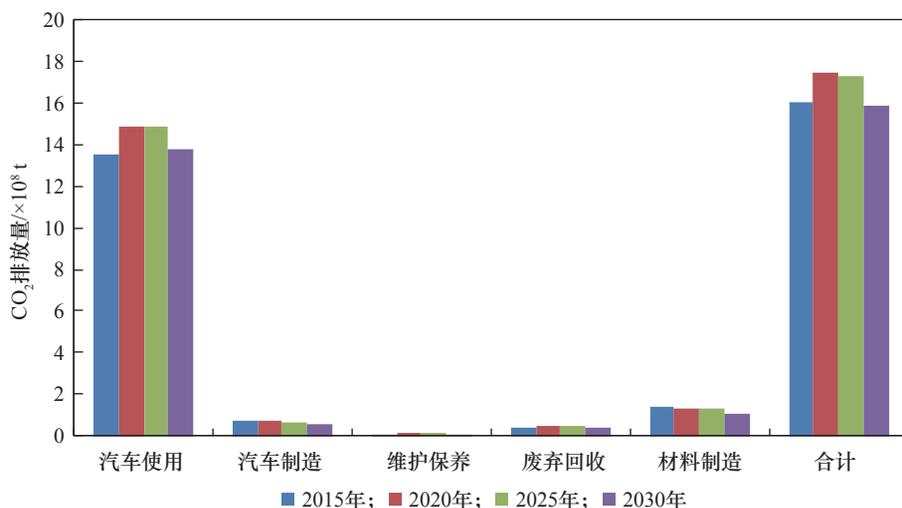


图 2 中国汽车 CO₂ 排放总量预测结果

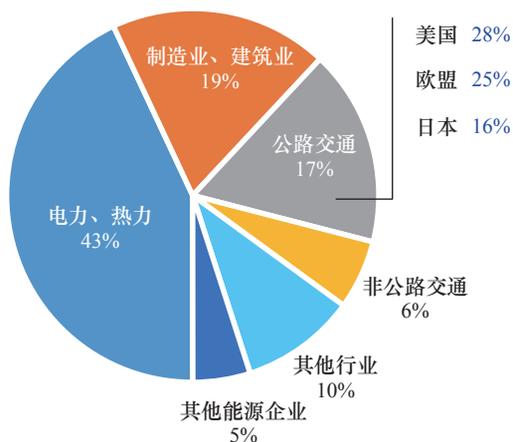


图3 全球道路运输产生碳排放在全总量中占比

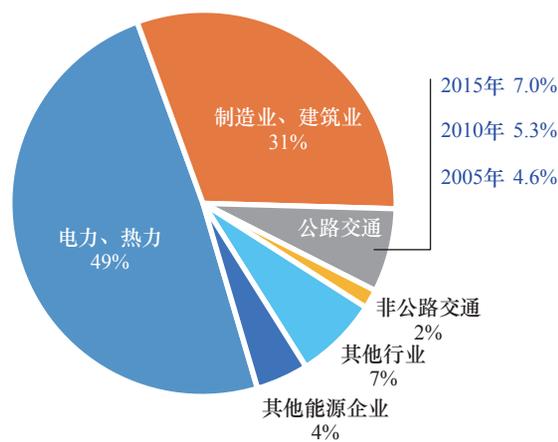


图4 中国道路运输产生碳排放在全总量中占比

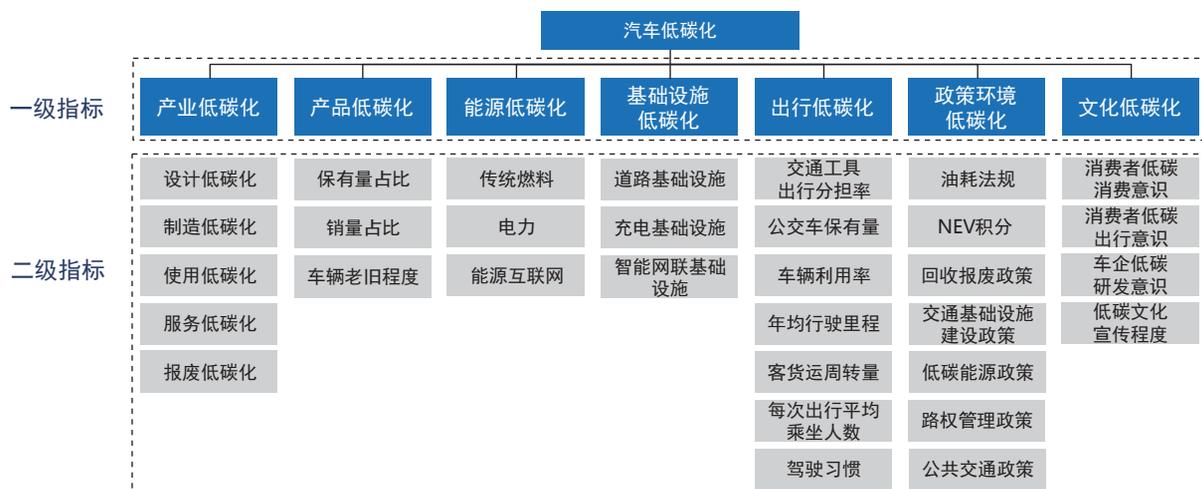


图5 国家汽车低碳化评价指标体系

三、中国乘用车低碳化技术路线

我国已经制定了严格的汽车油耗法规（见图6）来限制汽车CO₂排放[7]，这是我国乘用车CO₂排放强制法规，商用车马上也要实施强制性法规。过去我国油耗只是商业性的，排放污染物控制是强制性的。现在我国高度重视CO₂排放，出台了严格的油耗法规来控制乘用车CO₂排放，中国油耗法规有三个门槛：第一个是准入，达不到一定的条件不能准入，企业不能销售汽车；第二个是企业车队碳排放必须控制在一个水平下；第三个是如果企业销售车队达不到油耗目标，企业必须去购买碳配额。目前中国的油耗法规（CO₂法规）对所有企业是有效的，是中国汽车工业最严格的法规，这个法规是关系到企业生死存亡的法规。这体现了中国政府重视汽车工业节能减排工作，从图6可看到，从第三阶

段到第四阶段油耗降低27%，到第五阶段油耗降幅将超过20%以上。

全社会都要为汽车节能减排承担责任，包括政府、企业和消费者。降低油耗使产品成本增加，顾客是否愿意承受成本增加来购买达到油耗法规的汽车产品，是企业生存的关键。在考虑产品生命周期回报的前提下，根据对消费者购买意愿调查，对于乘用车顾客只愿意在3年内得到的降油耗的收益来付初始购置费。最后得出降低0.1L油需要增加的成本（见图7），如A0级车每降低0.1L油耗需要成本增加230元，而C级车每降低0.1L油则需要成本增加474元，企业要在这样的成本增加前提下达标。中国汽车企业在推广节油技术实现第四阶段油耗的同时，面临技术创新所带来的成本压力，成本压力也制约了汽车企业产品电动化的进程。

从未来各个油耗阶段汽油机达到CO₂排放和成

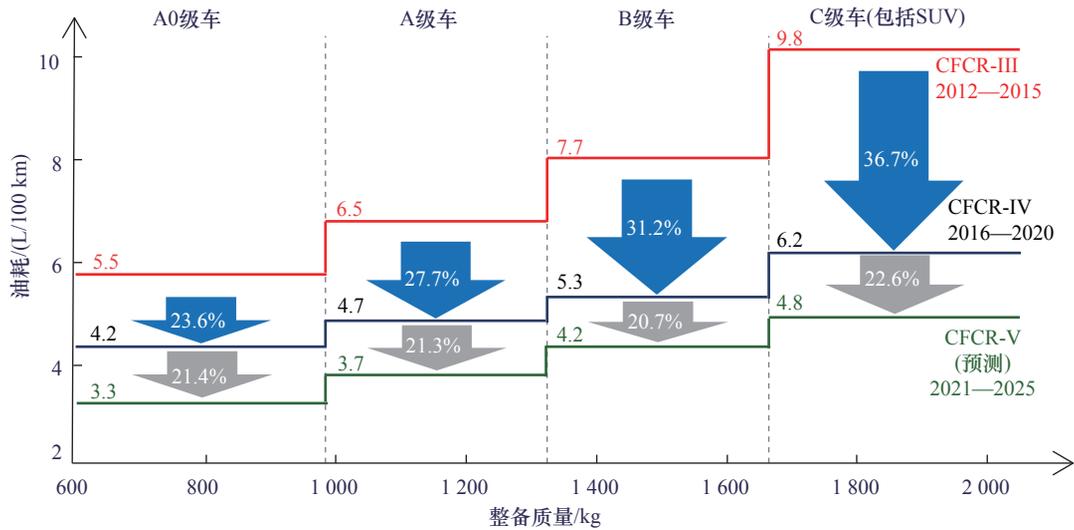


图6 中国乘用车油耗法规

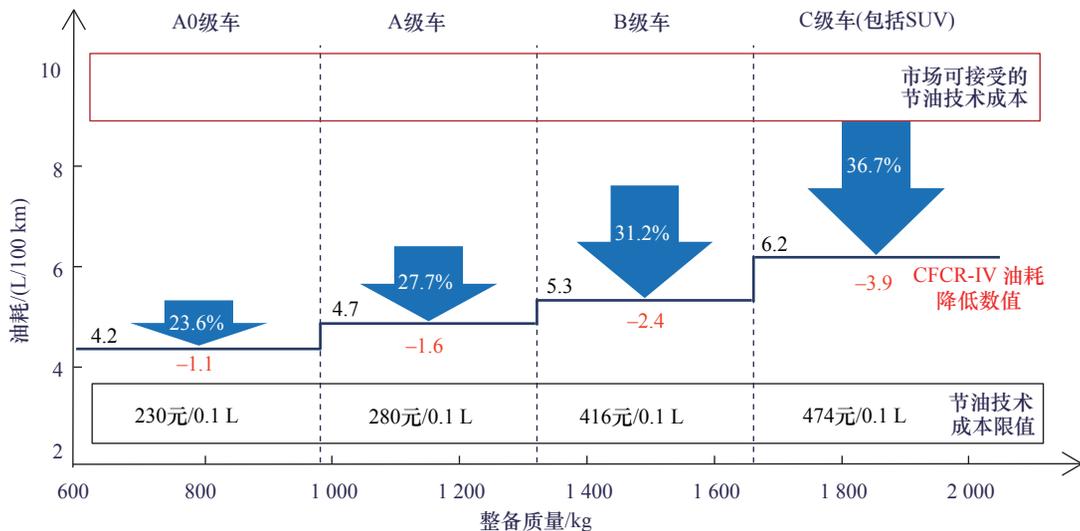


图7 中国乘用车油耗成本评估

本增加限值的可行技术来看，在2020年前，为达到汽油机热效率38%，实现5 L/100 km油耗的第四阶段油耗目标，可用的技术包括Miller循环、启停技术、可变气门升程（VVL）、整体式排气管、高效增压、低摩擦和轻量化技术。2025年实现第五阶段油耗目标，油耗要降到4 L/100 km，汽油机热效率须达到42%，可用的技术包括可变气门执行机构（VVA）、热管理、48 V（混合动力HEV或插电式混合动力汽车PHEV）、电子增压、废气再循环（EGR）、停缸、可变压缩比（VCR）、废气能量回收（WHR）、缸内喷水冷却、稀薄燃烧技术。预计到2030年，实现油耗为3.2 L/100 km的第六阶段，

发动机热效率须达到45%，更高成本的技术包括低温燃烧、大冲程缸径比、废热能量回收、绝热技术、发动机电动化和HEV/PHEV技术。

这些技术与当前的新能源电动化相结合，中国一汽提出了发动机电动化概念，考虑了发动机电动化的成本和节油的潜力，一代发动机结合了集成启动/发电机技术（BSG），二代发动机在一代发动机基础上进行发动机附件电动化技术创新（见图8）。

变速器的电动化创新性也存在很大空间，创新性的核心在于电机与变速器的高度集成。变速器的电动化可以带来强混合动力和插电式混合动力。48V轻混系统能够使B级车达到第四阶段目标，比

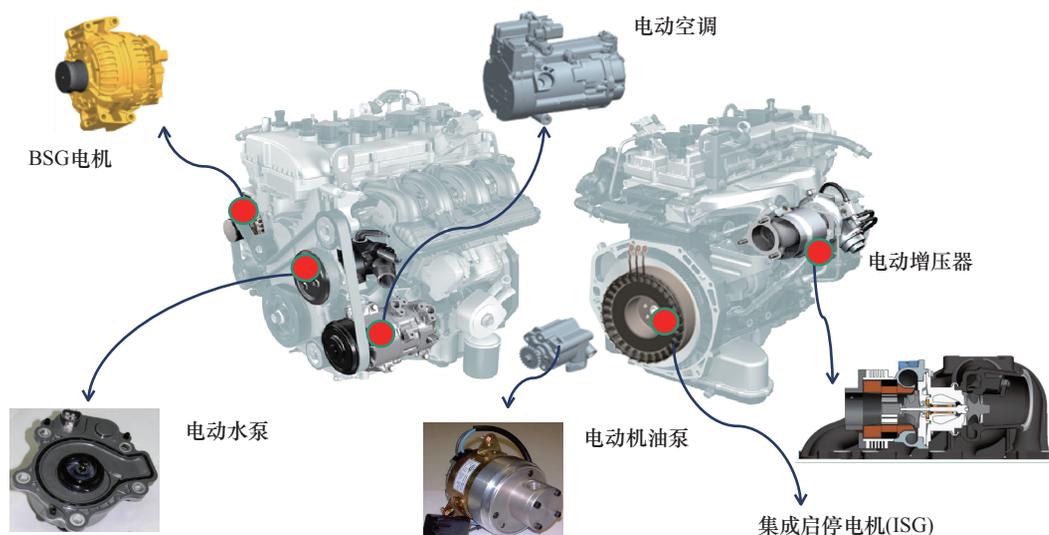


图8 发动机电动化

高压深混系统更具性价比优势，采用基于变速器电动化的混合动力技术，能使B/C级HEV车型达到第四阶段油耗目标，B/C级PHEV车型达到第五阶段油耗目标。

纯电动汽车对于每个油耗法规的阶段都有很大贡献。1辆A0级纯电动车，可平衡7.9辆B级传统车达到第四阶段油耗目标，可平衡2.3辆B级传统车达到第五阶段油耗目标。1辆A0级纯电动车，可平衡6.1辆C级传统车达到第四阶段油耗目标，可平衡2辆C级传统车达到第五阶段油耗目标。如考虑目前国家乘用车企业平均燃料消耗量（CAFC）奖励政策，纯电动车平衡CAFC的潜力还将成倍增加。

对氢燃料电池电动汽车的三种形式，即能量补偿型、功率混合型和全功率型进行了对比研究：认为对于全功率燃料电池发动机，低碳贡献是最合理的。全功率燃料电池汽车无需外接充电，通过快速加氢补充燃料，与传统内燃机汽车使用性能相当，是国际上低碳汽车发展的主流技术趋势。

四、中国商用车低碳化技术路线

商用车面临着巨大的降低油耗挑战任务，中国商用车2020年要实施第三阶段油耗法规，2025年将实施第四阶段油耗法规，两个阶段油耗将降低15%。美国将在2021年实施第二阶段法规，欧盟目前正在收集CO₂排放数据，预计在2022年会发

布商用车CO₂排放限值。

目前商用车油耗占整体车辆CO₂排放的比例为53%，而保有量大的乘用车才占到47%，中国对外石油依赖度高达65%，大量进口原油被用于商用车。提升商用车燃油经济性分两步走，第一步是发动机热效率要达到47%，因为对于商用车来说，柴油发动机仍然是主要的动力源，目前还没有大容量的动力电池，来解决高速公路运输的商用车低碳化问题。对于47%的发动机热效率，主要还是改进发动机的燃烧过程。关键是在三个非常重要的方面改进，一是燃烧室改进，二是共轨系统的改进，三是增压器的改进。三个方面中非常重要的就是必须要实现喷油速率可变的共轨，中国一汽研发了双轨喷油系统，一个高压轨，一个低压轨。通过两个轨的组合和控制系统，产生3种不同的喷油速率，目前已经获得了国家专利。燃烧过程优化最重要的就是要把NO_x和油耗同时降下来。增压器必须在低速和高速都有高的效率，双流道非对称增压器是最佳方案。

第四阶段就是柴油机热效率要达到50%。其中最重要的技术路线之一就是废气能量回收，这一技术路线能够有2%~4%热效率提升潜力。

商用车低碳化的重要技术路线要用清洁燃料，发动机使用天然气，可以显著降低CO₂排放，按C-WTVC测试循环，天然气发动机可以降低约7%的CO₂排放。未来商用车发动机开发应以天然气发动机为基本型，柴油机是变型，这是非常大的创举。

商用车采用混合动力降低CO₂排放在未来有

7%~10% 的效果, 是重要的低碳化技术路线。商用车智能化对于降低油耗有很大潜力, 一个是智能预测, 预测道路工况; 另外一个就是智能编队减少风阻, 具有约 20% 的降低油耗潜力。

五、对策建议

本文对中国汽车低碳化系统工程做了一定研究, 根据研究结果及研究中遇到的问题, 未来加速中国汽车低碳化进程, 对中国汽车低碳化工程建设提出了如下建议。

第一, 建立低碳汽车产业体系, 包括低碳数据库建设、产业链低碳体系建设和低碳管理体系; 第二, 能源和汽车要协同发展, 包括电力系统布局与电动车发展相协调, 氢能发展与氢燃料电池汽车发展相协调, 代用燃料与商用车技术发展相协调; 第三, 制定商用车低碳化战略, 通过提高现有产品热效率, 实现低碳化, 通过低碳燃料使用实现低碳化, 通过燃料电池, 实现能源转移, 实现低碳化; 第四, 实现绿色制造, 在制造环节上把碳排放降下来, 推进汽车企业绿色制造进程, 建立与汽车产业规模相适应的废弃回收体系, 大幅推广绿色、可循环再生原材料; 第五, 推动智能网联汽车发展, 加速智能汽车开发, 加速基础设施建设, 扩展行业合作; 第

六、通过大数据、互联网、人工智能等进一步降低汽车在使用环节的碳排放。

参考文献

- [1] 郑虹. 中国一汽材料与工艺技术的现状及发展 [J]. 汽车工艺与材料, 2017 (5): 1-8.
Zheng H. Current status and development of material and manufacturing technologies at China FAW [J]. Automobile Technology and Material, 2017 (5): 1-8.
- [2] 李骏, 张晓艳, 付磊, 等. 汽车低碳化与动力总成技术创新 [J]. 汽车技术, 2017 (4): 1-5.
Li J, Zhang X Y, Fu L, et al. Low carbon automotive and powertrain technology innovation [J]. Automobile Technology, 2017 (4): 1-5.
- [3] 刘宗巍, 史天泽, 郝瀚, 等. 中国汽车技术的现状、发展需求与未来方向 [J]. 汽车技术, 2017 (1): 1-7.
Liu Z W, Shi T Z, Hao H, et al. Current situation, development demand and future trend of automotive technologies in China [J]. Automobile Technology, 2017 (1): 1-7.
- [4] Ministry of Environmental Protection of Japan. Green house gas emission report 2014 [R]. Ministry of Environmental Protection of Japan, 2014.
- [5] Association of Automobile Manufacturers of Japan. Measures responding to global warming for automobile manufacturing industry [R]. Association of Automobile Manufacturers of Japan, 2014.
- [6] IEA. CO₂ Emission from fuel combustions(2008—2016) [R]. IEA, 2017.
- [7] GB 19578—2014. 乘用车燃料消耗量限值 [S]. 2014.
GB 19578—2014. Fuel consumption limits for passenger cars [S]. 2014.