

满足未来中国燃油消耗量法规的行业技术路线选择*

陈康达 赵福全 刘宗巍 郝瀚

(清华大学, 汽车产业与技术战略研究院 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 面向中国燃油消耗量法规建立了可对全行业进行系统的技术可行性及成本评估的技术路线选择模型, 并基于覆盖全行业的市场、技术数据库, 对2030年前中国市场上主流OEM(Original Equipment Manufacturer)为实现法规达标将采取的节能与新能源技术路线及达标成本进行了建模仿真和分析, 同时对行业整体技术路线、企业达标成本及达标难度进行了综合评估。通过对法规将产生的影响及技术发展趋势的分析, 为中国中长期节能与新能源技术发展提供参考和建议。

主题词 燃油消耗量法规 节能与新能源技术 技术路线 企业达标技术策略

中图分类号 U469.7

文献标识码 A

DOI: 10.19620/j.cnki.1000-3703.20181455

Technology Routes to Meet China's Future Corporate Average Fuel Consumption Regulations

Chen Kangda, Zhao Fuquan, Liu Zongwei, Hao Han

(Tsinghua Automotive Strategy Research Institute, State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084)

[Abstract] A technology route selection model was established which can systematically evaluate the technical feasibility and cost of the whole industry for China's CAFC regulations. Based on the whole market and technology database, the energy-saving and new energy technology routes and the compliance cost of the mainstream OEMs (Original Equipment Manufacturers) in China's market through 2030 were modeled and simulated to comply with standards. The overall technical routes of the industry, the compliance cost of enterprises, and the difficulty of complying with the standard were comprehensively evaluated. Through the analysis of the impact of laws and regulations and the development trend of energy-saving technologies, this paper aims to provide references and suggestions for the development of energy-saving and new energy technologies in the medium and long term in China.

Key words: Corporate average fuel consumption regulation, Energy-saving and new energy technology, Technology route, Technology strategy for compliance

1 前言

中国汽车市场的快速发展给中国带来了严峻的能源安全问题和环境挑战^[1-5], 为此, 2005年至今中国已经颁布实施了4个阶段的乘用车燃油消耗量法规^[6], 旨在推动我国先进节能技术发展和应用, 持续降低乘用车燃料消耗量。纵向对比来看, 一至四阶段国家标准均以整车整备质量作为基准参数, 第一、二阶段规定了乘用车燃料消耗量的限值, 第三阶段在单车限值标准的基础上引入乘用车企业平均燃料消耗量(CAFC)概念, 以整车整备质量作为基准规定了乘用车CAFC目标值, 并采用

CAFC实际值与目标值的比值作为评价指标, 企业可在满足总体CAFC要求下灵活调整产品结构。第四阶段仍延续第三阶段车型燃料消耗量限值和企业CAFC达标双重管理方案, 并且进一步加严了汽车单车限值和目标值要求。自此, 乘用车燃料消耗量法规已经成为中国政府实现汽车节能减排目标的重要举措, 而CAFC法规的设计对行业节能与新能源汽车产业发展及企业的产品、技术路线选择也有着根本性的影响^[7]。

面向未来, 中国燃油消耗量法规将日益严苛, 2025年行业平均目标值将由2020年的5 L/100 km降为4 L/100 km, 同时第五阶段(2021-2025年)法规将面临重大

*基金项目: 中国工程院委托项目《中国汽车低碳化国家战略及评价体系研究》(2016-XY-02-04); 国家自然科学基金青年科学基金项目《我国道路交通温室气体减排成本及潜力研究》(71403142)。

通讯作者: 郝瀚(1985—), 副教授, 博士, 研究方向为汽车产业发展与规划、生命周期评价方法及技术策略、方法论, hao@tsinghua.edu.cn。

调整,计划由阶梯型法规变为与美国CAFE(Corporate Average Fuel Economy)法规相同的连续型法规^[8]。第六阶段计划延续五阶段连续型法规,同时2030年行业平均目标值进一步降为3.2 L/100 km^[9]。一方面,面对第四阶段及五、六阶段逐步加严的连续型法规,行业整体技术路线发展趋势如何,各企业如何以最低成本达标,如何优化技术配置都是亟待考虑的重点问题。另一方面,科学评价法规对技术路线、产品路线、企业发展所产生的影响,及时对法规和技术路线进行优化和调整,前瞻性地制定适用于当下和中、长期发展的技术路线,对于缩小中国与发达国家的技术差距,保证国家能源及环境安全,以及引导企业制定达标技术策略具有重要的战略意义^[10]。

本文基于中国CAFC法规建立了可面向全行业进行系统的技术可行性及成本评估的技术路线选择模型,并基于全行业市场、技术数据库,对2030年前中国市场上27家主流OEM(Original Equipment Manufacturer)为实现CAFC法规达标将采取的节能与新能源技术路线及达标成本进行了计算和分析,并对行业整体技术路线、企业达标成本和达标难度进行了综合评估,通过对CAFC法规影响及节能技术发展趋势的分析,以期为中国燃油消耗量法规的完善和中长期节能与新能源技术发展提供参考和建议。

2 方法论及数据

对中国乘用车燃油消耗量法规产生的影响需要从全行业角度进行评估,这样才能更加全面和准确地反映节能与新能源技术路线及达标成本的变化趋势。本研究首先基于技术组合优化思想和庞大的技术数据库建立了节能与新能源技术路线选择模型,并进一步结合包含企业车型、销量、技术配置等数据的市场参数数据库,在不同CAFC法规情境下,以所有OEM最低成本满足CAFC法规要求为优化目标,建立了CAFC法规评估模型,如图1所示。该模型可面向全行业进行系统的技术可行性及成本评估,同时对不同情境下技术渗透率、技术路线、达标成本等的影响进行量化综合评估。该模型也是覆盖全行业及企业的CAFC法规评价及技术路线决策模型,通过结果对比,其优化效果比企业常规使用的“类贪婪”技术决策方法有明显提升,可实现企业达标成本降低约14%。

模型所评估的先进节油技术可分为发动机技术、变速器技术、电动化技术、整车技术4类,共覆盖增压、汽油缸内直喷(Gasoline Direct Injection, GDI)、连续可变

气门正时(Variable Valve Timing, VVT)、先进柴油机、轻量化、减摩擦、减阻以及目前市场上所有变速器结构和从启停、ISG(Integrated Starter Generator)、HEV(Hybrid Electric Vehicle)、PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)、BEV(Battery Electric Vehicle)等56项节能与新能源汽车技术。对每一个企业,以企业中期决策为时间情景,即基于现有平台,车型可以在4~8年实现重大升级和重新设计。

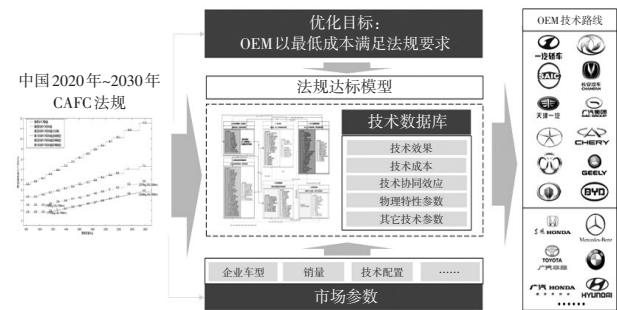


图1 CAFC法规达标模型整体框架

模型主要包含6个子模块,分别为技术参数模块、成本模块、市场信息模块、CAFC法规模块、法规外部政策模块和技术决策模块。首先判断其产品平台、技术基准等车队初始参数,再基于企业基础通过技术组合优化的方法对每一类技术路径依次进行应用和成本对比,直到企业以最小成本满足CAFC法规标准为止。需要注意的是,预测结果为模型根据OEM最小化达标成本原则得出,不代表企业实际规划。同时该研究针对燃油消耗量法规进行研究,并未将新能源汽车补贴及双积分政策^[11]考虑在内。

模型数据主要分为市场、企业和技术3个部分,市场数据主要包括销量、售价等,企业数据包括车型、动力平台、技术配置,技术数据包括技术成本、技术节能效果和技术的物理特性参数。其中市场及企业数据来源于中国汽车研究中心,技术成本和节能效果数据来自于美国国家研究委员会(National Research Council, NRC)、美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)和美国高速公路安全管理局(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)的技术评价报告^[12-15],技术物理重量参数来自于亚琛工业大学的节能技术评价报告^[16]。由于中国CAFC法规以整备质量为基准,因此技术的物理重量参数对于车型油耗和法规达标也有重要影响。

本文面向行业整体从关键技术路线、CAFC达标情况、整体节油贡献率、达标成本及企业达标难度等几个角度针对中国2020年、2025年、2030年CAFC法规的影响进行建模仿真和分析。

3 2030 年前行行业节能技术路线预测

3.1 发动机关键技术渗透率

如图2所示,在发动机关键技术方面,发动机减摩擦、VVT、VVL(Variable Valve Lift,连续可变升程)等技术的成本有效性较高,将成为未来满足CAFC法规的标配技术。涡轮增压小型化技术(Turbocharging and Downsizing)作为重要的发动机节油技术,EPA评估其中型车上节油率可达到11%~17%^[13],美国NRC评估其

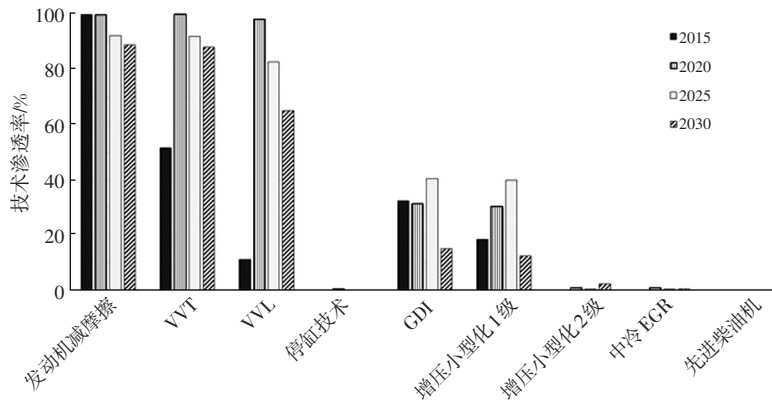


图2 发动机关键技术渗透率

3.2 变速器技术渗透率

图3为变速器关键技术渗透率。由图3可看出,当前中国市场自动变速器主要以4AT和6AT为主,未来变速器技术将呈现明显的多挡化趋势。2020年,4AT将逐渐被淘汰,8AT和CVT市场份额大幅上升;2030年,8AT和CVT将成为变速器市场主流,6DCT和8DCT将占据15%左右的市场份额,同时受电动车市场份额逐步提升的影响,自动变速器市场相对份额将出现下降。从自主品牌和合资品牌技术路线选择来看,当前自主品牌变速器主要以4AT为主,合资品牌变速器较自主品牌先进,6AT份额较大,同时未来合资品牌将应用更多的DCT和CVT技术,从而减少对电动汽车的依赖。

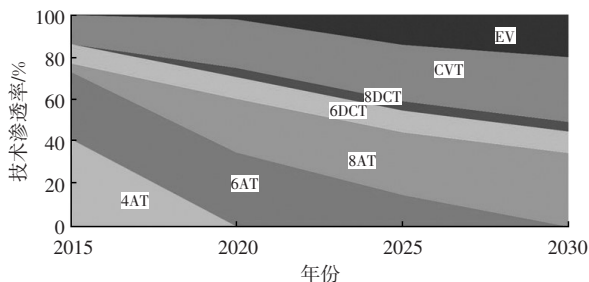


图3 变速器关键技术渗透率

3.3 电动化技术渗透率

如图4所示,未来在中国严苛的油耗法规下,ISG、强混技术将逐步替代启停技术获得大力发展,同时随着

节油率可达到9%~12%^[15],将在2025年前发挥较大的节能贡献。同时,尽管柴油机与汽油机相比具有更高的热效率,先进柴油机技术可实现20%~30%的节油率^[9],但成本和排放问题也是制约柴油机发展的致命问题,根据仿真结果中国市场上柴油机技术将彻底被摒弃。总体而言,发动机技术行业平均渗透率将呈下降态势,主要原因是未来电动车成本有效性的逐渐提高将带来内燃机总量的下降。

电动化的不断渗透,2030年电动化技术总占比将达到78%左右,纯内燃机汽车占比为22%左右,但内燃机仍将占据市场主流,只是以混合动力、插电式混合动力等不同形式存在。CAFC法规将驱动动力系统向电气化发展,传统内燃机汽车基于已有产业基础,通过电气化升级,可以长时间工作在高效率的特定工况区域,从而将大幅改善能耗及排放。正因如此,未来内燃机会与电机、电池结合成混合动力、插电式混合动力(包括增程式系统)等继续发挥作用。

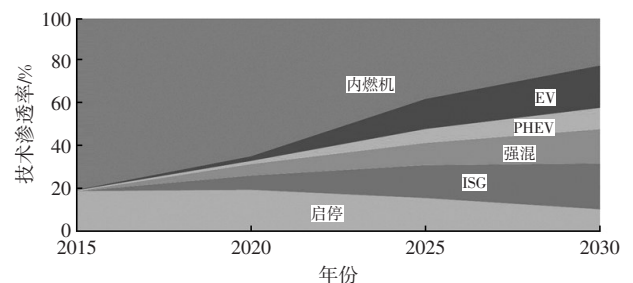


图4 电动化关键技术渗透率

3.4 整车关键技术渗透率

图5为整车关键技术渗透率。由图5可看出,随着油耗法规的不断加严,附件提升、低滚阻、低风阻等技术将成为CAFC法规达标标配技术。轻量化技术方面,2020年应用小轻量化率技术为主,2025年~2030年以中等轻量化率技术为主。但总体而言,轻量化技术在中国

以整备质量为基准的CAFC法规下应用前景较差,因为CAFC法规对整备质量的“非中立性”使得应用轻量化技术所获得的节油效果会在一定程度上被整备质量下

降带来油耗目标值的下降所抵消。同时与自主品牌车企相比,合资品牌整车技术配置更成熟,同时未来可持续依靠加大整车技术投入实现CAFC法规达标。

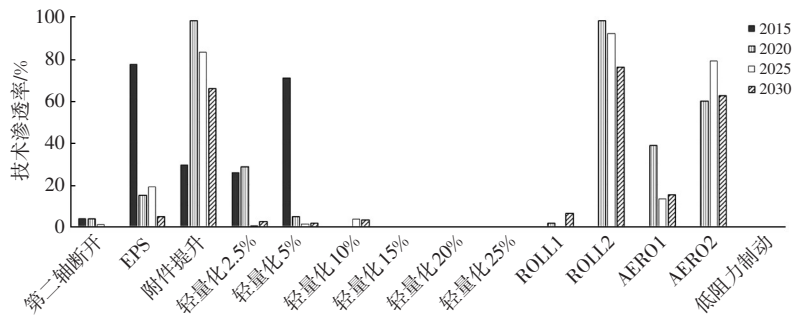


图5 整车关键技术渗透率

3.5 行业整体技术路线综合评估

3.5.1 行业整体达标技术路线

通过对发动机、变速器、电动化、整车4类56项关键技术行业整体渗透率的分析,由图6可以看出,2015年整体渗透率较高的是发动机减摩擦、VVT、GDI、4AT、EPS、轻量化等技术,其它先进节油技术还未被大量应用。

随着CAFC法规的不断加严,VVT、VVL、增压小型

化、8AT及低滚阻、低风阻等技术将迎来快速发展。2020年依靠发动机、变速器及整车技术等传统节能技术,搭配一定混合动力技术即可实现达标,其中启停技术渗透率接近20%,ISG、强混技术渗透率分别达到5%左右。随着CAFC法规的进一步加严和电动车成本有效性提高,2025年将在ISG和强混技术进一步提高的情况下,将有6.5%的PHEV和14.3%的EV导入。

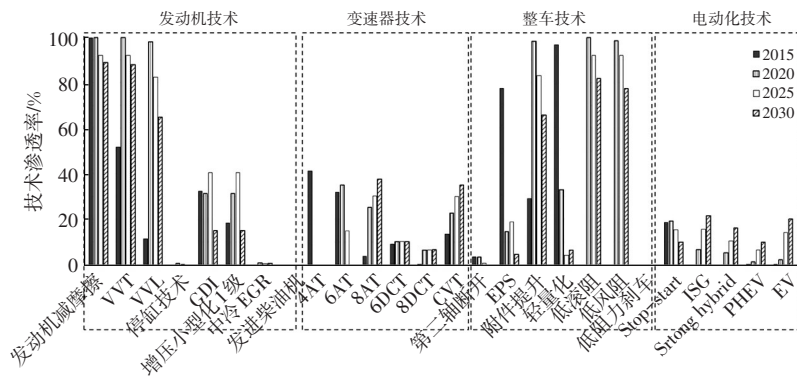


图6 行业整体技术渗透率

到2030年,发动机减摩擦、VVT、VVL、附件提升、低风阻、低滚阻等技术将成为标配技术,8AT和CVT将成为未来市场主力,4AT和6AT几乎完全被替代。总体来看,2030年CAFC法规达标需大力挖掘发动机、变速器、整车节油技术潜力,同时发展10%左右启停技术、20%左右ISG和16%左右强混技术。CAFC法规的加严和电动化成本的下降将使PHEV和EV的技术渗透率将分别达到10%和20%。

3.5.2 技术节油贡献率及达标成本预测

图7为2020年、2025年、2030年各类技术节油贡献率,由计算结果可知,2020年主要依靠发动机、变速器、整车(包括附件)技术即可实现CAFC法规达标,几乎不需要BEV、PHEV的贡献。而随着CAFC法规的不断加

严和传统节能技术达到上限,电动化技术渗透率和贡献率不断提高,2025年、2030年电动化技术将成为CAFC法规达标的主要贡献者,分别贡献44.1%和69.0%,占总成本投入的68.9%和89.0%。柴油机技术节油贡献率为0(图7中未标注)。

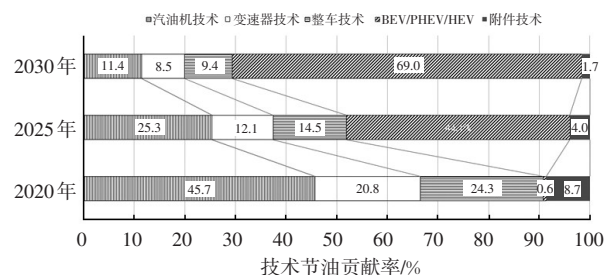


图7 技术节油贡献率

根据计算,相对于2015年乘用车车队,2020年、2025年、2030年单车达标增量成本分别为4 363元、14 878元、19 745元。2020年CAFC法规不但可以依靠改进传统节能技术实现,而且在不考虑其它刺激政策情况下,依靠传统技术是最佳选择。2025年电气化技术成本投入需要大幅增加。同时由图8车队技术增量成本分布情况可以看出,2020年到2030年的成本分布的峰度逐渐变小,产品的增量成本分布更加分散,直方图从单峰向多峰转变,这反映了车型的技术路线和产品组合的变化,单峰代表单一的汽油机技术路线,多峰则反映了HEV、PHEV和BEV的多种技术路线。汽车企业在2020年CAFC法规下,仍可以采用较为均匀地整体提升车队的燃油经济性的产品战略。但在2025和2030年更加严格的CAFC法规下,在提升车队整体燃油经济性的基础上,开发更加清洁的应用先进动力总成技术的节能明星车型,多种节能技术路线并举是最优的产品组合战略^[17]。

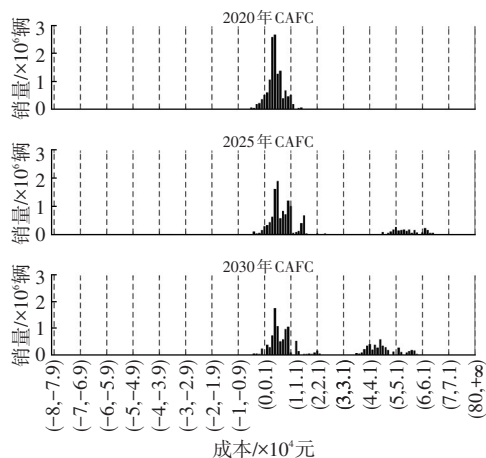


图8 2020年~2030年CAFC法规下的车队技术增量成本分布

3.5.3 企业达标难度分析

图9和图10分别从油耗下降率和成本承载力两个角度分析了中国市场上27家主流企业在2020年、2025年、2030年燃油消耗量法规下企业的达标难度。油耗下降率和成本承受能力分别指以2015年企业状况为基准,通过技术进步和优化达到未来法规标准时,企业CAFC值需要下降的幅度和企业增量成本占产品售价的比例。从油耗下降率的角度来看,先发技术优势较大,新能源产品应用较多的企业(如A1、B1、C1和A2、B2、C2)可以轻松实现达标,2020年油耗下降率分别为5%和7%,2025年分别为27%和28%,2030年分别为41%和42%;相比之下,A10、B10、C10达标难度最大,2020年、2025年、2030年油耗下降率分别达到29%、46%、55%;A4、B4、C4等企业的车型整备质量大,但由于

先发技术优势,达标难度适中。

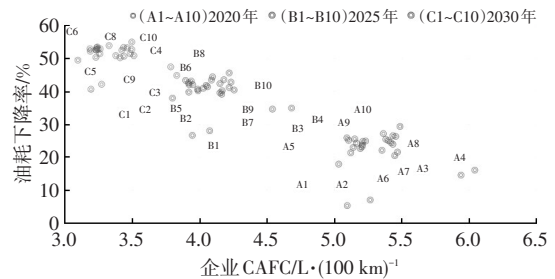


图9 企业达标难度(油耗角度)

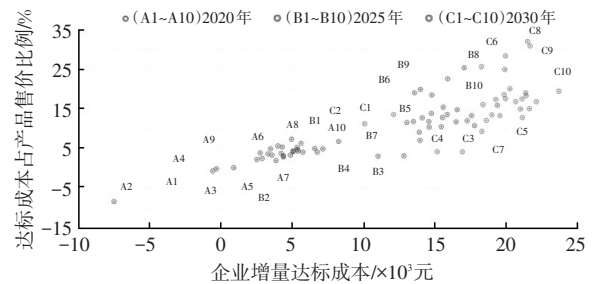


图10 企业达标难度(成本角度)

从成本承载力角度来看,一方面先发技术优势越大的企业,达标增量成本越低,压力相对小。如A1、B1、C1和A2、B2、C2由于新能源汽车的投入,在不需要增加成本的情况下即可满足2020年CAFC法规。另一方面,产品市场定位高、平均售价高的企业具备更强的成本投入承受能力,往往能够摊低达标增量成本与平均售价的比率,缓解企业的法规达标压力。而大批企业由于未来法规达标增量成本将占售价25%甚至30%左右,将面临巨大的达标压力。

4 结束语

在中国燃油消耗量法规的日益严苛,同时伴随着法规形式由“阶梯型”向“连续型”调整的背景下,科学评价法规对技术路线、产品路线、企业发展所产生的影响,及时对法规和技术路线进行优化和调整,前瞻性地制定适用于当下和中、长期发展的技术路线,对于缩小中国与发达国家的技术差距,保证国家能源安全及环境友好,以及引导企业制定达标技术策略具有重要的战略意义。

研究建立了在CAFC法规下进行节能技术路线选择和决策的组合优化模型,面向全行业进行了系统的技术路线可行性及成本评估。模型优化效果比企业常规技术决策方法有明显提升,成本可降低约14%。

研究结果表明,在行业技术路线方面,发动机减摩擦、VVT、VVL、附件提升、低滚阻、低风阻技术将是未来CAFC达标的标配技术。变速器多挡化趋势明显,8AT和CVT将成为中国变速器市场主流。未来中国严苛的

法规下 ISG、强混技术将逐步替代启停技术获得大力发展。2030 年电动化技术总占比将达到 78% 左右,纯内燃机汽车占比 22% 左右,同时相比合资品牌,自主品牌需要投入更多的电动化技术才可实现达标。但另一方面,中国以整备质量为基准的法规会限制轻量化技术的应用。

从达标成本和达标难度角度,面向日益严苛的油耗法规,2020 年后多种节能技术路线并举是最优的技术组合战略。2025 年将迎来传统汽油机份额大幅下降和电气化技术投入的大幅增加,2020 年、2025 年、2030 年单车达标增量成本分别为 4 363 元、14 878 元、19 745 元。同时,法规达标压力由企业先发技术优势和产品市场定位共同决定。一方面先发技术优势越大的企业,达标增量成本越低,压力相对小。另一方面企业产品平均售价较高的企业具备更强的投入成本承受能力,往往能够摊低达标成本与平均售价的比率,缓解企业的法规达标压力。

参 考 文 献

- [1] 国家信息中心,国家发展和改革委员会. 2017 中国汽车市场展望[M]. 北京:机械工业出版社, 2017.
- [2] 中国汽车工业协会,中国汽车技术研究中心,丰田汽车公司. 汽车工业蓝皮书:中国汽车产业发展报告(2017)[M]. 北京:社会科学文献出版社, 2017.
- [3] 彭元正,董秀成. 中国油气产业发展分析与展望报告蓝皮书(2016-2017)[M]. 北京:中国石化出版社, 2017.
- [4] IEA. World Energy Outlook Special Report 2015: Energy and Climate Change, Available at: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChange.pdf>. 2015.
- [5] 国家发展和改革委员会. 我国提交应对气候变化国家自主贡献文件[EB/OL]. http://www.ndrc.gov.cn/xwzx/xwfb/201506/t20150630_710204.html, 2015.
- [6] 能源与交通创新中心. 中国乘用车燃料消耗量发展年度报告 2016[R]. 2016.
- [7] Zhao F, Hao H, Liu Z. Technology Strategy to Meet China's 5 L/100 km Fuel Consumption Target for Passenger Vehicles in 2020[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2016, 18(1): 7-15.
- [8] Chen K, Zhao F, Liu Z, et al. Fuel Economy Regulations and Technology Roadmaps of China and the US: Comparison and Outlook[J]. SAE Technical Paper 2018-01-1826.
- [9] 中国工业与信息化部. 节能与新能源技术路线图[M]. 北京:机械工业出版社, 2016.
- [10] Liu Z, Hao H, Cheng X, et al. Critical Issues of Energy Efficient and New Energy Vehicles Development in China [J]. Energy Policy, 2018 (115): 92-97.
- [11] 工业和信息化部,财政部,商务部,等. 乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法[EB/OL]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1146557/n1146624/c5824932/content.html>, 2017.
- [12] EPA, NHTSA. Draft Technical Assessment Report: Midterm Evaluation of Light-duty Vehicle Green Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards for MY2021-2025[R]. 2016.
- [13] EPA, NHTSA. Regulatory Impact Analysis: Final Rulemaking for 2017-2025 Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards[R]. 2012.
- [14] EPA, NHTSA. 2017 and Later Model Year Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emissions and Corporate Average Fuel Economy Standards[S]. 2012.
- [15] NRC. Cost, Effectiveness and Deployment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles[R]. 2015.
- [16] RWTH Aachen University. CO2 Reduction Potential for Passenger Cars Until 2020[R]. 2012.
- [17] 刘宗巍,赵福全. 论汽车产业(第 1 卷)[M]. 北京:机械工业出版社, 2017.

(责任编辑 文 楫)

修改稿收到日期为 2019 年 1 月 13 日。