

面向 CAFC 法规的汽车企业轻量化策略研究*

郝瀚^{1,2}, 王司南^{1,2}, 李骁^{1,2}, 刘宗巍^{1,2}, 赵福全^{1,2*}

(1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084; 2. 清华大学汽车产业与技术战略研究院, 北京 100084)

[摘要] 中国即将实施乘用车第四阶段油耗法规。通过轻量化实现车辆节能, 进而满足油耗法规成为汽车企业的必然选择。本研究对第四阶段油耗法规背景下汽车企业轻量化策略进行了研究。首先建立了以增量成本为目标函数, 以轻量化技术路线选择为设计变量, 以满足 2020 年 CAFC 法规以及一定标准的安全性、动力性为约束条件的最优化问题模型; 然后分析了中国道路交通背景下乘用车轻量化与燃油经济性、安全性、动力性、成本之间的定量关系; 最后, 以中国某汽车企业为案例, 建立针对该企业的优化模型并求解, 得到该汽车企业轻量化技术的最优决策。研究表明, 为满足 2020 年油耗法规目标, 在轻量化技术对 CAFC 贡献率为 10%-30% 的情况下, 中国乘用车平均整备质量降低 2%-6%, 平均每辆车增加轻量化成本 1000-3000 元。

关键词: 汽车企业; 油耗法规; 轻量化; 技术路线

Research on the Lightweighting Strategy of Automotive Manufacturers to Meet China's CAFC Standard

Hao Han^{1,2}, Wang Sinan^{1,2}, Li Xiao^{1,2}, Liu Zongwei^{1,2} & Zhao Fuquan^{1,2*}

1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing, 100084;

2. Tsinghua Automotive Strategy Research Institute, Beijing, 100084

[Abstract] China's Phase IV CAFC standard is going to be implemented, which imposes great challenges to domestic automotive manufacturers. Vehicle lightweighting is the necessary technology in achieving the regulation targets. In this study, the lightweighting strategy of automotive manufacturers in complying with the CAFC standard is developed. First, an optimization model with vehicle cost as the objective function, lightweighting technology choice as design variables, the CAFC targets and certain standards of safety, dynamic performance as constraint conditions is established. Then, the relationships among vehicle fuel economy, safety, dynamic performance and cost are analyzed. At last, a case of automotive manufacturer's lightweighting strategy is developed by solving the optimization problems. The research indicates that with lightweighting technology contributing 10-30% to addressing the CAFC standard, passenger cars will averagely have a weight reduction of 2-6% and a cost increase of ¥1000-3000 by 2020.

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)、北京自然科学基金项目“绿色北京”建设背景下的汽车产业链生态效益评价研究(9162008)、工信部“建立节能与新能源汽车技术评价体系研究”项目(工装函[2014]134号)资助。

原稿收到日期为××××年××月××日, 修改稿收到日期为××××年××月××日。

前言

汽车产业在国民经济中占有重要地位，同时对国家能源、环境产生重要影响^[1]。针对日益严峻的能源和环保挑战，中国自 2005 年起实施乘用车企业平均燃料消耗量法规（CAFC, Corporate Average Fuel Consumption）。中国 CAFC 法规共经历了 2005-2008 年、2009-2012 年、2012-2015 年、2016-2020 年四个阶段。其中第三阶段由 GB 19578-2014《乘用车燃料消耗量限值》规定 2015 年生产的乘用车平均燃料消耗量降至 6.9 升/百公里^[2]。第四阶段由 GB 27999-2014《乘用车燃料消耗量评价方法及指标》规定 2020 年生产的乘用车平均燃料消耗量降至 5.0 升/百公里^[3]。如图 1 所示，根据国家标准，中国第三、第四阶段的燃油消耗量目标值以整车整备质量作为基准参数，规定了对应质量段的乘用车燃料消耗目标值，目标值随着整备质量增加呈现阶梯式的上升形态。

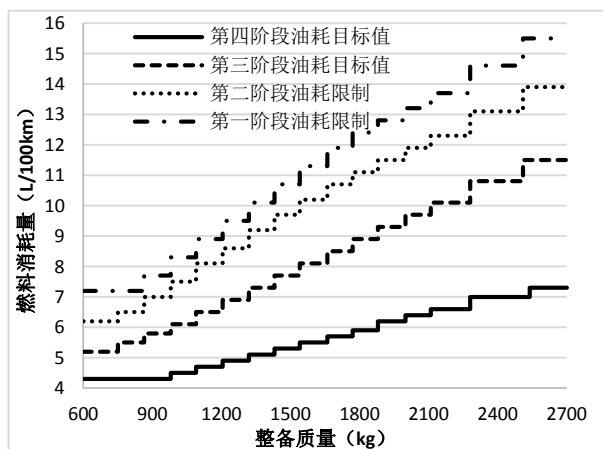


图 1 中国第三、四阶段油耗限值情况

面对中国 CAFC 法规，“节能技术”和“新能源技术”是汽车企业主要的应对策略，“节能技术”中，提高传动效率和燃烧效率、降低风阻、轻量化等是各国企业广泛采取的节油手段^[4]。其中，轻量化技术主要有三种手段。第一，将钢铁材料替换为镁铝合金、高强度钢、碳纤维等；第二，对汽车进行重设计或二次轻量化，对汽车结构或零部件进行更合理

的设计制造；第三，降低汽车的尺寸，生产更小更轻的汽车。相关研究表明，三种手段结合最高可使汽车轻量化 40%（690kg），降低油耗 20%以上^[5]。因此轻量化技术是应对 CAFC 法规的必要手段。

油耗法规最先诞生于 1975 年的美国，世界各大汽车企业及部分科研院所开始了对油耗法规的相关研究，尤其是九十年代以来，形成了大量的研究成果，主要集中在能源与油耗、排放与环境、轻量化、安全以及动力性能几个领域。1975 年至 1985 年，美国油耗限制从 13.5mpg 提高到了 27.5mpg^[6]，短短十年间，燃油经济性翻倍，按照当前汽车工业的研发规律来看也仅仅是两代车型的时间，节油的步伐迈的过大，而技术无法及时跟进，严苛的油耗法规导致汽车过度轻量化，对汽车的安全性、动力性都产生了较大影响，此举在美国产生了很大争议。受此影响，有关轻量化技术对油耗、安全性、动力性的影响的研究逐渐受到业界重视，并产生了一些成果。

节油是汽车轻量化的主要目的，不同研究表明，乘用车每轻量化 100kg 降低的油耗在 0.23-0.67L/100km 之间。以美国麻省理工大学的 Lynette W. Cheah 的研究成果为例，轿车每轻量化 100kg 节油 0.4L/100km，SUV 每轻量化 100kg 节油 0.5L/100km^[5]。受汽车轻量化影响，七八十年代美国汽车的安全性受到广泛质疑，1989 年，Crandall 和 Graham 首次研究了轻量化对汽车安全性的影响，结果表明，美国第一阶段油耗法规（1978-1985）增加了大约 20%的死亡率^[7]。1992 年至 2004 年，Leonard Evans 使用数据统计的方法，研究交通事故死亡人数与汽车尺寸、整备质量的关系。结果表明，轻量化对汽车安全性存在一定影响，但增加车型的尺寸可以弥补轻量化对安全性的影响^{[8][9][10][11]}。近年来，受美国颁布《2007 年能源独立和安全法案》影响，CAFE 法规的研究再次成为业界话题。2007 年，Feng An 和 John DeCicco 提出了 PSFI 模型，研究 CAFE 法规对汽车动力性、油耗、尺寸等方面的影响^[12]。在 Feng An 和

John DeCicco 的 PSFI 模型基础上, 2008 年, Lynette W. Cheah 等人建立了 ERFC 模型^[13], 分析企业对油耗、动力性、质量等因素之间的取舍权衡。针对新一轮美国油耗法规 (2010-2016) 的制定与实行, 美国官方机构 EPA (美国环保总局) 与 NHTSA (美国高速公路安全管理局) 对法规可能导致的轻量化进行了预测, 预计为达到 2016 年美国油耗法规标准, 相比 2010 年, 汽车将轻量化 5%-10%。与此类似, Frost 和 Sullivan 的研究也表明, 中短期内, 汽车将轻量化 5%-8%^[5]。

与国外研究相比, 国内学者更加重视对汽车轻量化的技术层面的研究, 对轻量化产生的对油耗、安全性、动力性的影响以及轻量化技术路线的研究还需要继续深入。同时, 中国 CAFC 法规出台较晚, 目前汽车企业对于应对 CAFC 法规所应采取的轻量化策略尚不清晰, 本研究旨在分析中国汽车整备质量与油耗、安全性、动力性之间的关系, 量化几方面因素的权衡取舍, 为目标企业给出合理的轻量化技术决策。

1 研究方法

1.1 轻量化策略优化模型

建立轻量化策略优化模型, 是给出科学合理的轻量化策略的有效手段。在满足 CAFC 法规的前提下, 选择合理的技术路线, 降低企业成本, 是企业进行技术决策的主要目标。因此, 将轻量化技术企业最小增量成本设定为最优化问题模型的目标函数, 企业增量总成本等于每辆车的轻量化成本乘以每辆车的销量并求和, 可将此关系写为式(1):

$$\min F(x) = [c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_n] \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, c_n 为不同技术路线的成本, S_m 为第 m 个车型的销量。设计变量 x_{mn} 用来选择轻量化技术路线, 取值为 0 或 1, 1 代表第 m 个车型选择了第 n 个技术阶段, 0 代表未选择, 由于轻量化技术路线只能选择一个, 每列只

能存在一个 1 (此为隐含的约束条件)。

设计此目标函数, 需要已知轻量化技术路线。中国企业的轻量化技术路线公开资料较为缺乏, 不同企业对应的技术路线也有一定程度的差异, 但考虑到轻量化作为一种共性汽车节能手段, 其成本与节油效果在国内外存在较强的一致性, 本文参考了 NHTSA 的轻量化技术路线研究成果^[14]和美国国家科学院国家研究委员会的研究成果^[15], 设计技术路线见表 1, 近似替代中国企业汽车轻量化技术路线。

表 1 轻量化技术路线设计

轻量化百分比	A 级车成本 (元)	B 级车成本 (元)
-3.6%	-261	-326
-1.8%	-131	-163
0	0	0
1%	398	497
2%	825	1031
5%	2320	2899
10%	5562	6953
15%	9114	11392
20%	12664	15830

由于 A 级车与 B 级车在车身尺寸、整备质量等方面有较大差距, 故将 A 级车与 B 级车成本分开计算。在设计轻量化技术路线时, 考虑到潜在的“重量化”可能, 当汽车选择重量化时, 由于将较轻的先进材料 (如镁铝合金、高强度钢等) 替代为较重的普通钢材, 因而在材料成本、加工成本、装配成本等方面都得到了降低, 因而增量成本为负。

约束条件的设计决定优化的结果, 满足 CAFC 法规是最为重要的约束条件, 到 2020 年, 企业整体达到 CAFC 目标值, 其中轻量化技术占据一定比例的贡献率, 该条件针对企业整体起约束作用, 见式 (2):

$$[f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_n] \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_m \end{bmatrix} \geq (N-T)\eta \quad (2)$$

其中, f_n 是不同技术路线下各车型的油耗, N 是 CAFC 当前值, T 为 CAFC 目标值, η 为实现目标值的百分比。在使用该约束条件时, 可以对 η 值进行改变, 以研究不同贡献率下, 成本的变化及其趋势。当前值 N 根据现有车型计算, 参见式 (3), 而目标值 T 随轻量化所带来的整备质量变化而变化, 利用式 (4) 计算。

$$N_{CAFC} = \frac{\sum_i^N FC_i \times V_i}{\sum_i^N V_i} \quad (3)$$

$$T_{CAFC} = \frac{\sum_i^N T_i \times V_i}{\sum_i^N V_i} \quad (4)$$

其中, i 表示乘用车车型代号, FC_i 表示第 i 个车型的燃料消耗量, 其中 T_i 表示第 i 个车型对应的燃料消耗量目标值, V_i 表示第 i 个车型的年度生产、进口或销售量^{[3][4]}。

动力性的约束, 主要是从“重量化”方面进行约束。汽车实施轻量化后, 动力性会有一些的提升, 但考虑到“重量化”的可能, 需要约束目标车型不能因重量化损失过度的动力性。采用加速时间作为动力性约束的参数, 该条件对每个车型起约束作用, 见式(5), 其中, P_i 为每辆车的加速时间, P 为约束的加速时间。

安全性的约束, 参考国外研究成果, 以死亡风险作为约束条件, 即轻量化后的车型死亡风险不应大于某值, 该条件对每个车型起约束作用, 见式(6), 其中, R_i 为每辆车的死亡风险, R 为约束的死亡风险。

$$P_i \leq P \quad (5)$$

$$R_i \leq R \quad (6)$$

在约束条件的选择上, 企业可以根据自身研发能力和产品定位进行安全性和动力性的约束。需要注意的是, 法规约束针对目标企业整体油耗, 而安全性及动力性约束针对每款车型, 这样设计是为了避免优化结果出现安全性或动力性过差的个别车型。

由于本优化模型中的设计变量 x 只能取值为 0 或 1, 这种全部分量取整数值的优化问题被称为整数规划问题, 而本优化模型为整数规划的特殊型 0-1 规划问题, 将优化模型归结为 0-1 规划的一般形式。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min & f = c^T x \\ \text{s.t.} & Ax \leq b \\ & A_{eq}x = b_{eq} \\ & x = 0,1 \end{array} \right. \quad (7)$$

其中, f 为目标函数, A 为不等式约束矩阵, b 为不等式约束向量, A_{eq} 为等式约束矩阵, b_{eq} 为等式约束向量, x 取 0 或 1。

求解 0-1 规划问题, 通常有分枝定界法和隐枚举法两种解法, 其中分枝定界法在整数规划问题中更为常用, 扩展性更强, 且有大量的算法实例可以参考, 因而, 本研究采取分支定界法求解 0-1 规划问题, 借助 MATLAB 进行优化计算, 这里略去求解过程。

1.2 轻量化对于车辆性能的影响

1.2.1 轻量化对于燃油经济性的影响

汽车整备质量是影响燃油经济性的重要因素之一, EPA 在其研究报告中采用 $\text{ton} \cdot \text{mpg}$ 对汽车整备质量与油耗之间关系进行衡量和评价。 $\text{ton} \cdot \text{mpg}$ 是一个针对当年所有车型进行统计计算出的平均值, 指单位质量 (ton) 的油耗 (mpg)。参考 EPA 公布的 2006-2008 年车型数据, 美国沃德咨询公司 (Ward's communications) 在其研究报告中统计得出, 在美国汽车市场 2006-2008 年期间的车型, 汽车每降低 100kg 整备质量, 相应的减少 0.53L/100km 的油耗 (美国标准工况)^[5]。

$\text{ton} \cdot \text{mpg}$ 的表达式为:

$$\text{ton} \cdot \text{mpg} = \frac{\text{ton} \cdot \text{mile}}{\text{gallon}} \quad (8)$$

(8)

将单位换为中国常用的单位, 定义 f :

$$f = \frac{\text{kg}}{\text{L}/100\text{km}} = \frac{\text{kg} \cdot 100\text{km}}{\text{L}} \quad (9)$$

(9)

依据中国汽车数据, 分别计算 2010 年-2015 年中国的 f 值, 并线性回归推测至 2020 年, 见图 2

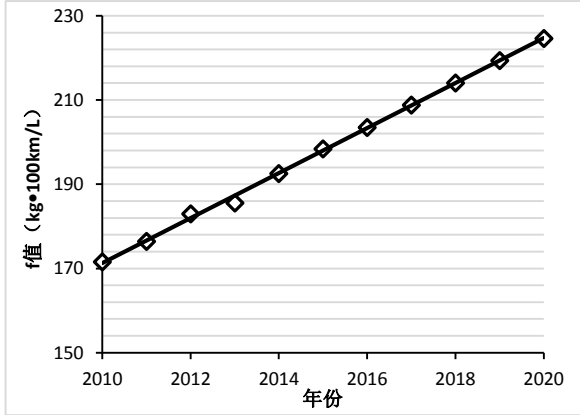


图 2 中国 2010-2020 年 f 值变化情况

2020 年的 f 值为 224.61kg·100km/L, 进而推算出油耗与整备质量的关系:

$$\delta_{FUEL} = \delta_{mass} \cdot \frac{1}{f} \quad (10)$$

代入数据:

$$\delta_{FUEL} = 100 \times \frac{1}{224.61} = 0.445L/100km \quad (11)$$

结果显示, 2020 年推出的新车, 每轻量化 100kg, 油耗将降低 0.445L/100km, 虽然中美两国行驶工况不同, 但比较美国的相关研究 0.23-0.67L/100km 的结果^[5], 数值相近。

1.2.2 轻量化对于安全性的影响

整备质量的降低带来了较好的燃油经济性, 但与此同时, 其对安全性的影响也逐渐体现出来。从 1989 年开始, 美国相关机构逐渐开展汽车轻量化对安全性的影响研究, 相关研究普遍采用死亡人数或死亡率作为原始数据进行统计学分析。美国建有死亡分析报告系统 (FARS, Fatality Analysis Reporting System) 收录全国交通事故的数据, 而中国相应的公开数据十分缺乏。鉴于此, 参考现有研究成果, 进行符合中国汽车市场实际情况的改进。

L Evans 在其研究中建立了汽车相互碰撞的安全性公式^[11], 见式(12)。

$$r_{1,2} = c \times \frac{1}{(L_1^{2.45} + L_2^{2.45})} \times \left(\frac{m_2}{m_1}\right)^{1.79} \quad (12)$$

其中, $r_{1,2}$ 为 1 车与 2 车相撞时, 1 车的死亡风险, c 为常数, L_1 为被测车型的车长,

L_2 为标准车车长, m_1 为被测车型的质量, m_2 为标准车质量

为使每辆车的安全性具有可比性, 引入年度标准车, 使各车型与标准车碰撞, 得出的死亡风险值作为本文安全性的评价标准。标准车的计算见式(13)(14)。

$$L_{typical\ car} = \frac{\sum L_i \cdot S_i}{S} \quad (13)$$

$$M_{typical\ car} = \frac{\sum m_i \cdot S_i}{S} \quad (14)$$

其中, L_i 为第 i 个车型的车长, M_i 为第 i 个车型的质量, S_i 第 i 个车型的销量, S 为当年乘用车总销量。

将中国数据代入得到 $L=4517mm$, $M=1355kg$, 与美国 2004 年标准车 ($L=4800mm$, $M=1400kg$) 相比, 数值差距不大, 鉴于两国国情差别, 中国的结果更小一些是合理的。

由标准车的值得常数 $c = 2 \times 4.517^{2.45}$, 将此值代入式(12), 即可计算出中国各车型与标准车碰撞后的死亡风险。为直观说明, 表 3 选取了中国市场中一些典型车型作为算例, 结果与直观印象相符:

表 2 中国市场上常见车型的安全性指标

车型	风险	车型	风险
奇瑞 QQ 0.8L	2.73	奥迪 Q5 2.0T	0.55
斯柯达晶锐 1.4L	1.67	奔驰 E300L	0.50
福特福克斯三厢	1.05	奔驰唯雅诺	0.37
标致 508 2.0L	0.78	兰德酷路泽	0.25

将中国 2014 年所有在售车型的死亡风险计算结果拟合为曲面, 得到图 3, 整体上, 整备质量越大, 车长越长, 安全性越好, 符合公式的预期结果。

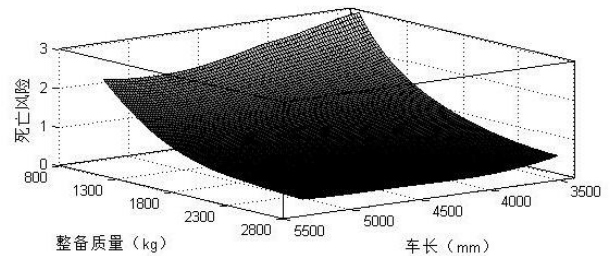


图 3 中国汽车整备质量、车长与死亡风险的关系

1.2.3 轻量化对于动力性的影响

本研究采用比功率和加速时间作为汽车动力性的评价指标，依据中国数据，对各车型的动力性进行量化。比功率可以方便的研究汽车整备质量与动力性的关系。图 4 是中国新车平均比功率的变化趋势，显然，近六年来，中国汽车市场的汽车动力性稳定上升。

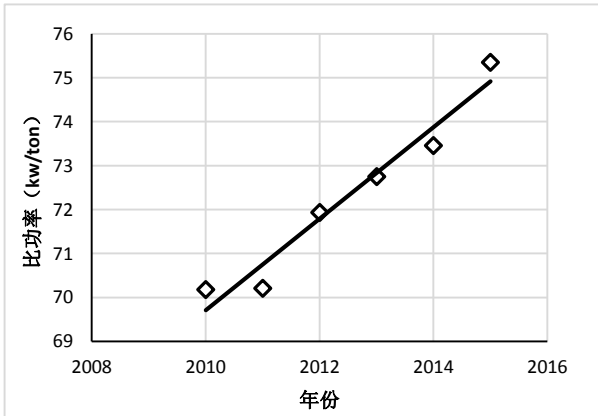


图 4 中国 2010-2015 年平均比功率变化趋势

鉴于中国没有权威的汽车加速时间数据，为使用加速时间直观的表现汽车动力性，我们可以在获得比功率的值后，进一步估算出汽车的加速时间。1976 年, Malliaris A.C, Hsia H & Gould H.三人发表了科研成果，首次给出了整备质量与加速时间的关系^[16]，见式 (15)。

$$t = G \left(\frac{P}{M} \right)^{-g} \quad (15)$$

其中，t 零至百公里为加速时间，P 为最大功率，单位为马力，M 为整备质量，单位为磅，G 和 g 为常数。根据此公式计算出 0-60mph (0-97km/h) 的加速时间。应用此公式需要计算 G 和 g 两个常数的值，调研美国研究的结果制成表 3。

表 3 国外研究中，F 与 f 的取值结果

来源	G	g	来源	G	g
EPA Auto 2008	0.89	0.80	Berry 2010	0.85	0.76
EPA Manual	0.97	0.78	MIT 2009	0.67	0.87

由于计算时间不同，不同的数据源，得出的结论是不同的。因此，有必要应用最新的数据对 G 值与 g 值进行重新计算，由于中国没有官方的加速时间统计，为得到合理的结果，选取一组中国市场销量较高，各档次分布均匀的代表车型，以厂家公布或第三方测评的加速时间为数据，计算得到 G=0.95，g=0.72。总体来看，与美国研究的结果近似，而产生差距的主要原因是汽车整体动力性能的差异。

2 研究成果

2.1 算例选择

结合设计的技术路线，为使研究更真实性和代表性，选择了中国市场中有一定占有率、技术水平较好、市场定位中等、与表 4 所设计轻量化技术路线较符合的某目标企业，为保密起见隐去企业名称。2014 年度，目标企业共生产 7 个车型，按整备质量划分，共 26 款。对这 26 款车进行数据统计调研，结果如表 4。

表 4 目标企业 26 款车型的特征参数

车型代号	排量 (L)	变速箱	版本	整备质量 (kg)	2014 年销量 (万辆)
A	1.5	MT	舒适版	1058	1.22
	1.5	CVT	舒适版	1078	4.22
	1.5	CVT	时尚版	1084	2.56
	1.5	CVT	精英版	1105	0.41
	1.5	CVT	领先版	1116	0.06
B	1.5	MT	舒适版	1100	2.12
	1.5	5AT	舒适版	1130	1.53
	1.5	5AT	精英版	1165	0.89
C	2.4	5AT	豪华版	1690	1.9
	2.4	5AT	导航版	1715	0.2
	3	6AT	四驱版	1870	0.13

D	1.8	SMT	舒适版	1240	4.12
	1.8	5AT	舒适版	1275	8.9
	1.8	5AT	豪华版	1300	2.2
	1.8	5AT	旗舰版	1310	0.5
E	2	CVT	舒适版	1495	2.51
	2	CVT	精英版	1510	3.3
	2	CVT	豪华版	1520	1
	2.4	CVT	舒适版	1545	2.2
	2.4	CVT	豪华版	1555	1.8
	3	6AT	旗舰版	1660	0.04
F	2.4	5AT	舒适版	1650	2.74
	2.4	5AT	精英版	1675	0.55
	2.4	5AT	豪华版	1710	0.19
G	1.3	SMT	舒适版	1016	0.41
	1.3	5AT	舒适版	1056	0.04

考虑到同一车型，车身选择相同的技术路线，但不同排量车型可在发动机、传动系等应用不同程度的轻量化技术，为使算例更接近现实情况，结果更加准确，将 26 款车型按照车型及排量的区分方法重新分类，最终得到十款计算车型进行再轻量化技术路线选择。但根据法规标准，目标值和实际值应使用 26 款车型计算。

设计约束条件时，针对安全性与动力性，设定了标准约束，为丰富研究成果，在其基础上设计了较强约束和较弱约束，为直观显示约束条件的选择，在此总结为表 5。

表 5 不同标准的约束条件选择

约束条件	死亡风险	加速时间	CAFC 贡献率
标准约束 (中国市场前 65%)	A 级车: 1.8 B 级车: 0.8	A 级车: 12.9 B 级车: 11.7	0-50%
较强约束 (中国市场前 50%)	A 级车: 1.65 B 级车: 0.76	A 级车: 12.5 B 级车: 11.1	
较弱约束 (中国市场前 80%)	A 级车: 2 B 级车: 1	A 级车: 13.5 B 级车: 12.3	

2.2 优化结果

算例目标企业具有技术较好、资金实力较强、市场定位中等，因此，以标准约束进行

分析具有代表性和真实性。在 CAFC 贡献率的约束选择中，轻量化作出 30% 的贡献率是较为符合实际情况的，为比较结果，再设定一个值为 10% 进行对比，图 5 图 6 即为优化结果。

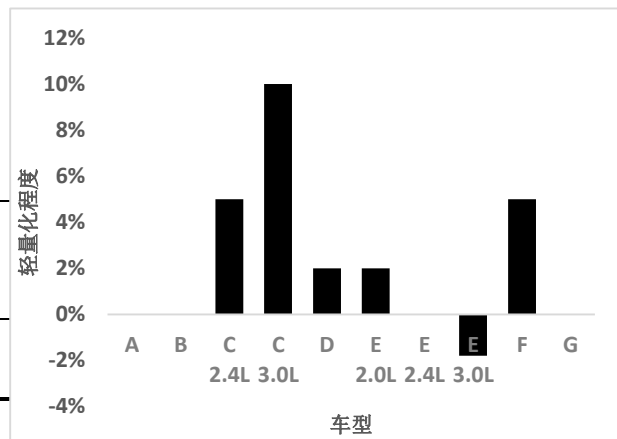


图 5 10% 贡献率下不同车型轻量化技术路线选择

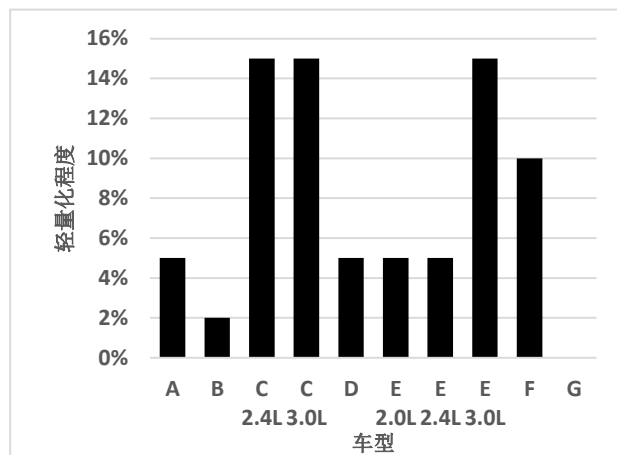


图 6 30% 贡献率下不同车型轻量化技术路线选择

G 车型不能同时满足动力性和安全性约束条件，属于较为落后的产品，因此建议此车型停产或更新换代。在 10% 目标值贡献率下，整体所需轻量化程度较低，A 车型、B 车型、E 车 2.4L 均不变，其他车型选择了 2% 到 10% 不同程度的轻量化技术路线，而 E 车 3.0L 选择了 1.80% 的“重量化”，选择该技术路线，企业增加总成本约 3.7 亿元，平均每辆车增加成本约 818 元。在 30% 目标值贡献率

下，整体所需轻量化程度较高，各类车型选择了 2%到 15%不同程度的轻量化技术路线，选择该技术路线，企业增加总成本约 14.1 亿元，平均每辆车增加成本约 3119 元。

在 10%的目标值贡献率下，E 车 3.0L 选择重量化的路线，主要出于两点原因。第一，重量化可以使目标值放宽，E 车 3.0L 在重量化 1.8%后，油耗目标值从 5.5L 上升到 5.7L，对于整備质量在 CAFC 法规相应质量段靠后的车型，增加较少的整備质量对自身油耗影响不大，可以起到放宽油耗目标值的作用。第二，在轻量化技术路线中，选择“重量化”技术，受较重的替代材料材料成本、加工成本、工艺成本等较低影响，技术成本不增反降，在本例中，满足约束条件的前提下进行重量化，可以起到削减企业成本的作用。

为更好比较优化结果，假设 CAFC 贡献率达到 30%，选择表 5 的较强和较弱约束，其中较弱约束得到与标准约束相同的结果，即图 6，主要是因为所选算例目标企业技术水平较高，标准约束和较弱约束在 30%贡献率下效果相似。而较强约束则由于更的高动力性和安全性标准，对轻量化程度有较严格的约束，轻量化程度较高的车型有所减少，技术路线更趋向平均，即 5%-10%的轻量化，见图 7。

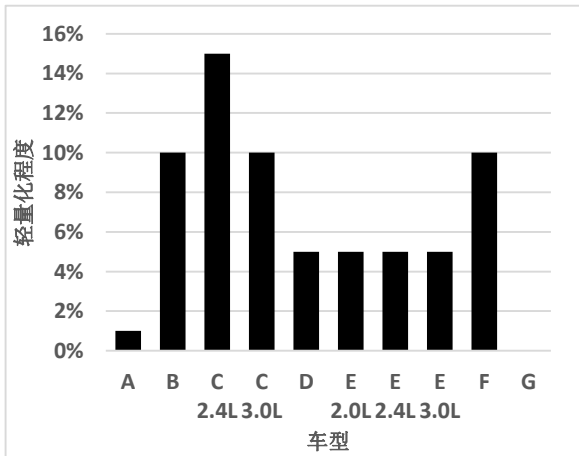


图 7 30%贡献率、较强约束条件下不同车型轻量化技术路线选择

根据轻量化技术为实现 CAFC 目标值贡献的比例不同，研究其平均成本的变化趋势。由于不能完全依靠轻量化实现 CAFC 目标值，

当贡献比例过大时，安全性和动力性均不能保证，故取 50%为上限，每 5%为一个单位，结果见图 8。轻量化对 CAFC 贡献率较低的情况下，三种约束成本相差较少，当贡献率上升后，拉开了一定差距，对于企业整体而言，每辆车存在几百元的成本差距则是亿元的投入。

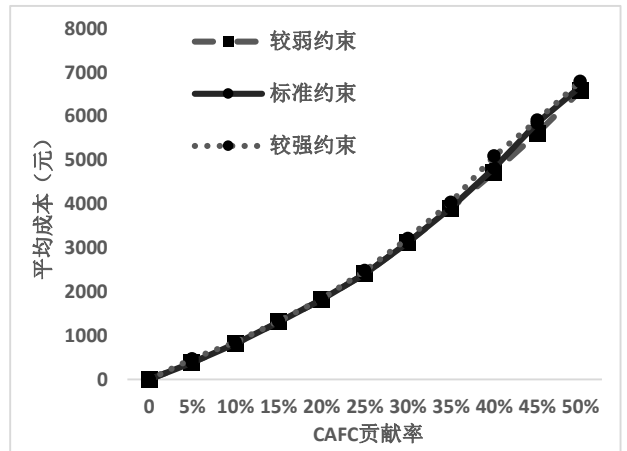


图 8 不同 CAFC 贡献率下应用轻量化技术平均每辆车增加的成本

从计算结果看，随着轻量化对实现 CAFC 目标值所做贡献比例的增大，平均成本整体呈现增加的趋势，当贡献率达到 50%时，标准约束下平均成本达到了 6676 元，对企业而言，有一定成本压力。为更好的比较 A 级车和 B 级车的成本压力，根据计算结果绘制图 9

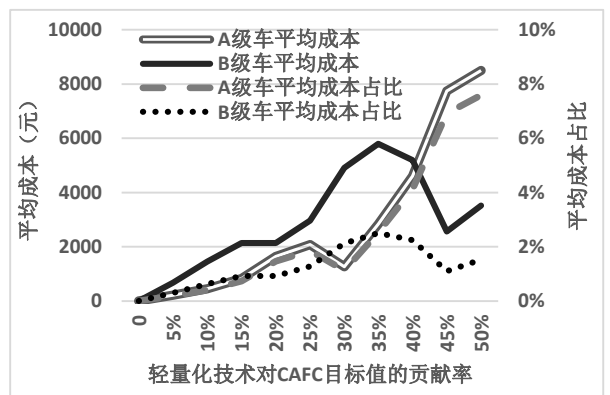


图 9 不同 CAFC 目标值贡献率下 A 级车与 B 级车各自增加的成本及其占比

结果显示，当贡献率较小时，A 级车成

本压力较小，B 级车成本压力较大，但当贡献率提升后，由于本算例目标企业的 A 级车销量更大，对企业整体目标值影响更大，A 级车承担了更大的成本压力，而 B 级车则相对降低了成本。对于中国汽车业整体而言，A 级车份额同意大于 B 级车，因此中国整体应有图 9 相似结果。

依据目标企业在设定不同 CAFC 贡献率进行优化计算的结果，绘制图 10，结果显示，汽车轻量化程度与 CAFC 的贡献率存在近似的线性关系，为实现 5%-50% 的 CAFC 贡献率，目标企业需平均轻量化 1%-10.8%。平均轻量化程度不宜超过 10.8%，当对 CAFC 贡献率超过 50% 后，安全性约束将不能保证。

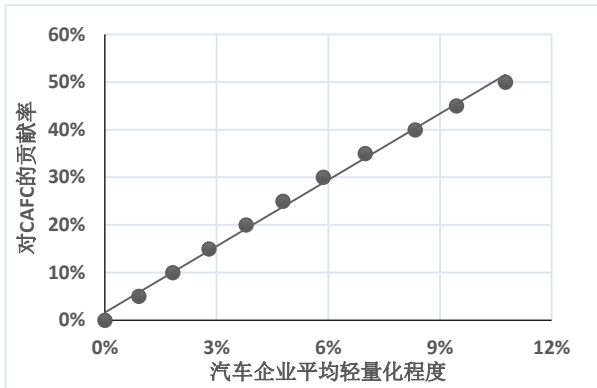


图 10 不同轻量化程度对 CAFC 的贡献率

3 结论

本研究定量研究了中国汽车整备质量与燃油经济性、动力性、安全性之间的关系，针对 CAFC 法规建立了汽车企业的轻量化策略优化模型并为目标企业给出了最优轻量化策略。本研究的贡献主要体现在两个方面，一是从方法学层面提出了普适于中国各汽车企业应对 CAFC 法规的轻量化策略的方法；二是以实际企业为案例，研究了中国汽车企业为实现第四阶段 CAFC 法规所需的轻量化程度及轻量化成本。本研究的主要结论如下。

(1) 当轻量化技术为实现 CAFC 法规贡献 30% 时平均每辆车的轻量化增量成本约 3000 元，考虑其他技术贡献另 70% 的成本，预计与中国官方给出的 1.6 万元总增量成本

[3] 基本吻合。但中国市场销量最大的 A 级、B 级车普遍处于 8-20 万元区间，合资车企对 1.6 万元的增量成本有一定承担和消化能力，但对自主品牌车企而言就难以消化，成本压力很大^[17]。

(2) 优化结果预示了未来五年中国乘用车的整备质量变化趋势，以目标企业为代表，根据成本分析，轻量化做出 10%-30% 的 CAFC 贡献率是较为合理的，因此预测中国市场车型到 2020 年平均整备质量将降低 2%-6%。

(3) 优化结果反映出中国 CAFC 法规的两点不足。第一，在最优解的技术路线选择中，部分车型增加了整备质量，放宽油耗限值的同时还节省了成本，这是法规目前存在的漏洞。第二，以整备质量作为标准制定油耗限值，对汽车安全性影响较大，相比之下，美国以 footprint 作为标准，更加鼓励尺寸大而整备质量轻的车型，大尺寸在一定程度上可以弥补轻量化造成的安全性问题。

参考文献

- [1] 赵福全, 刘宗巍. 我国建设汽车强国的战略判断[J]. 汽车工程学报, 2014, 4(5):313-318.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB19578-2014 乘用车燃料消耗量限值[S]. 北京: 中国标准出版社. 2014.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB27999-2014 乘用车燃料消耗评价方法及指标[S]. 北京: 中国标准出版社. 2014.
- [4] 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 & Environmental Policy, 2016, 18(1):7-15.
- [5] Cheah L W. Cars on a diet: the material and energy impacts of passenger vehicle weight reduction in the US[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [6] NHISA. Summary of fuel economy performance[EB/OL]. US Department of Transportation, NHTSA, 2011.
- [7] Crandall R W, Graham J D. The effect of fuel economy standards on automobile safety[J]. The Journal of law & economics, 1989, 32(1): 97-118.

-
- [8] Evans L, Frick M C. Car size or car mass: which has greater influence on fatality risk?[J]. American journal of public health, 1992, 82(8): 1105-1112.
- [9] Evans L, Frick M C. Car mass and fatality risk: has the relationship changed?[J]. American journal of public health, 1994, 84(1): 33-36.
- [10] Evans L. Causal influence of car mass and size on driver fatality risk.[J]. American Journal of Public Health, 2001, 91(7):1076-1081.
- [11] Evans L. How to make a car lighter and safer[R]. SAE Technical Paper, 2004.
- [12] An F, DeCicco J. Trends in technical efficiency trade-offs for the US light vehicle fleet[R]. SAE Technical Paper, 2007.
- [13] Cheah L W, Bandivadekar A P, Bodek K M, et al. The trade-off between automobile acceleration performance, weight, and fuel consumption[J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2008, 1(2008-01-1524): 771-777.
- [14] NHTSA. Mass Reduction for Light-Duty Vehicles for Model Years 2017-2025[R]. 2014
- [15] National research council of the national academies. Assessment of Fuel Economy Technologies for Light-Duty Vehicles[R]. 2014
- [16] Malliaris A C, Hsia H, Gould H. Concise description of auto fuel economy and performance in recent model years[R]. SAE Technical Paper, 1976.
- [17] 赵福全, 刘宗巍. 五升油耗挑战自主品牌发展模式[J]. 汽车科技, 2015 (2): 1-4.

作者简介:

郝瀚(1985-), 男, 吉林通化人, 助理研究员, 主要从事汽车产业研究, 侧重于产业发展与规划、生命周期评价方法、以及技术策略方法论等;

王司南(1991-), 男, 辽宁铁岭人, 博士在读, 主要从事节能技术组合优化方法, 汽车节能法规和技术路线评价比较研究;

李骁(1993-), 男, 宁夏银川人, 本科生, 主要从事汽车轻量化技术与汽车节能法规关系的研究;

刘宗巍(1978—), 男, 辽宁朝阳人, 副研究员, 主要从事汽车企业管理研究, 侧重于研发体系建设、产品开发流程与项目管理、以及技术路线评估等;

赵福全(1963—), 男, 辽宁铁岭人, 教授, 博士生导师, 主要从事汽车产业发展、企业运营与管理、技术发展路线等领域的战略研究。

联系方式:

地址: 清华大学汽车产业与技术战略研究院,

北京市海淀区清华大学汽车研究所 303,

100084

电话: 13146316969

E-mail: 528lixiao@163.com