

# 油耗法规下的整车轻量化研究

文 | 道依然

我国从 2001 年开始正式启动汽车燃料消耗量标准及政策研究和制定。2014 年我国正式颁布了 GB 27999-2014《乘用车燃料消耗量评价方法及指标》，并于 2016 年起正式实施。新一期的标准采用企业平均燃料消耗量评价体系，并按整车质量分组设定车型燃料消耗量评价体系。本文就新一期标准中按整车质量分组设定车型燃料消耗量评价体系，从企业角度出发结合不同质量分组、不同类型车辆以及不同动力总成配置开展有关整车轻量化策略方面的研究，试图分析新法规对整车轻量化工作的影响，并指导整车开发过程中的轻量化工作。

近年来，我国经济持续快速发展，对石油资源的需求不断增长，与此同时我国汽车保有量也在不断增加，并由此带来一系列相应的问题：能源紧张问题日趋突出、环境保护压力日趋增大。为有效应对这些问题，欧、美、日等汽车工业发达国家都在采取积极措施，推动和促进汽车节能技术发展、提高汽车燃

料经济性水平，相继完成新一轮针对 2020 年甚至更长远的各年度乘用车燃料消耗量标准法规制定及执行，对乘用车燃料消耗量及对应的 CO<sub>2</sub> 排放提出更加严格的要求。我国从 2001 年开始正式启动汽车燃料消耗量标准及政策研究和制定。

## 概述

近年来，我国经济持续快速发展，对石油资源的需求不断增长，能源供需矛盾日益突出，对进口石油的依赖度不断提高。同时，我国汽车工业发展迅速，汽车保有量持续增加，由此带来的能源紧张问题日趋突出。此外，雾霾频繁肆虐于我国北京及广大中东部地区上空。虽然雾霾形成机理有待深入研究，但减少车辆的尾气排放当前被视为是应对雾霾的一项重要举措。因此加快发展节能环保汽车，既是缓解燃油供应矛盾、减少尾气排放、改善大气环境的需要，也是未来和谐汽车社会的需求，更是我国汽车产业健康可持续发展的必然选择。

为应对能源与环境问题，欧、美、日等汽车工业发达国家都在采取积极措施，推动和促进汽车节能技术发展、提高汽车燃料经济性水平，相继完成新一轮针对 2020 年甚至更长远的各年度乘用车燃料消耗量标准法规制定，对乘用车燃料消耗量及对应的 CO<sub>2</sub> 排放提出更加严格的要求。

2004 年，国家标准委发布了我国控制汽车燃料消耗量的第一个强制性国家标准，后续随着时间的推移，陆续发布了一系列标准，对乘用车的燃料消耗量指标和限值不断加严。2014 年，国家标准委发布了 GB 27999-2014《乘用车燃料消耗量评价方法及指标》和 GB 19578-2014《乘用车燃料消耗量限值》强制性国家标准（第四阶段油耗法规），旨在实现 2020 年乘用车新车平均燃料消耗量水平降至 5L/100km。当前阶段下的新油耗法规采用企业平均燃料消耗量评价体系，并按整车质量分组设定不同整备质量下的车型燃料消耗量的评价体系。即具有不同整备质量的车型所对

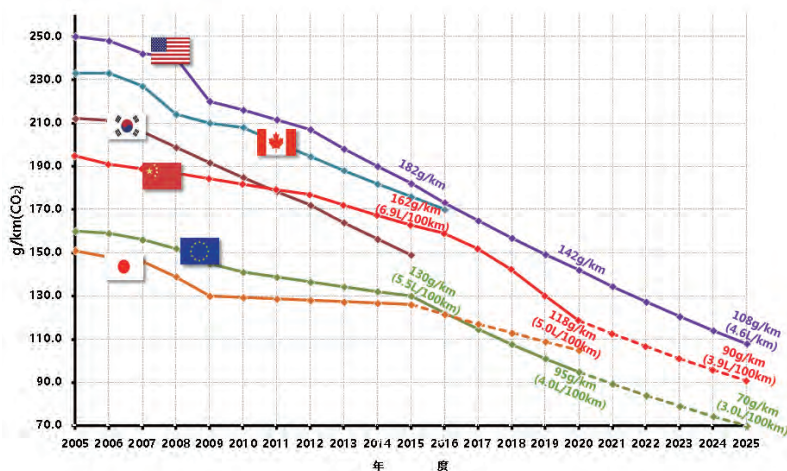


图 1 主要国家和地区燃料消耗量状态及标准对比

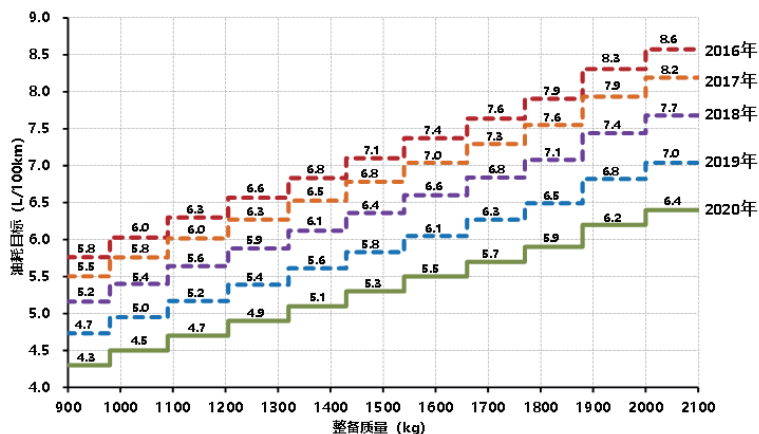


图 2 乘用车四阶段油耗法规要求

应的燃料消耗量目标值也不同。

众所周知，在整车轻量化过程中，必将涉及到整车整备质量的变化。当轻量化所引起的质量变化超出了该车型的质量分组时，根据法规其对应的燃料消耗量目标值也随之加严，此时整车轻量化所带来的降油耗效果是否能抵偿燃料消耗量目标值的加严成为了厂家在开展整车轻量化工作过程中所不得不考虑的问题。

针对这一问题，本文从企业车型开发的角度出发，通过不同质量分组车型、不同类型车辆以及不同动力总成配置开展研究和验证工作，以分析四阶段油耗法规对整车轻量化工作的影响。

### 四阶段油耗法规分析

为贯彻落实《发展规划》的要求，推动我国先进汽车节能技术的发展和应

用，持续降低乘用车燃料消耗量，2014年，国家标准委发布了 GB 27999—2014《乘用车燃料消耗量评价方法及指标》，目标在 2020 年乘用车平均油耗水平实现 5.0L/100km。其中 2020 年，对应各质量分组下的车型燃料消耗量目标值按表 1 中的规定 100% 执行。

此外规定自 2016 年起，各企业平均燃料消耗量与企业平均燃料消耗量目标值的比值不大于表 2 中的要求。

由此可得出四阶段(2016~2020)

表 1 车型燃料消耗量目标值 - 四阶段油耗法规

| 整车整备质量 (CM)<br>kg | 车型燃料消耗量目标值<br>L/100km |
|-------------------|-----------------------|
| CM ≤ 750          | 4.3                   |
| 750 < CM ≤ 865    | 4.3                   |
| 865 < CM ≤ 980    | 4.3                   |
| 980 < CM ≤ 1090   | 4.5                   |
| 1090 < CM ≤ 1205  | 4.7                   |
| 1205 < CM ≤ 1320  | 4.9                   |
| 1320 < CM ≤ 1430  | 5.1                   |
| 1430 < CM ≤ 1540  | 5.3                   |
| 1540 < CM ≤ 1660  | 5.5                   |
| 1660 < CM ≤ 1770  | 5.7                   |
| 1770 < CM ≤ 1880  | 5.9                   |
| 1880 < CM ≤ 2000  | 6.2                   |
| 2000 < CM ≤ 2110  | 6.4                   |
| 2110 < CM ≤ 2280  | 6.6                   |
| 2280 < CM ≤ 2510  | 7.0                   |
| 2510 < CM         | 7.3                   |

表 2 企业平均燃料消耗量要求

| 年度        | 企业平均燃料消耗量与企业平均燃料消耗量目标值的比值 |
|-----------|---------------------------|
| 2016 年    | 134%                      |
| 2017 年    | 128%                      |
| 2018 年    | 120%                      |
| 2019 年    | 110%                      |
| 2020 年及以后 | 100%                      |

各年度各整车质量分组所对应的燃料消耗量要求，具体数值如图 2 所示。

可见在整个四阶段中，当前我国乘用车通常所处的质量分组范围内

(1000kg ≤ CM ≤ 1800kg)，相邻两个质量分组所对应的燃油消耗量目标值差异为 0.2 ~ 0.3L/100km。

## NEDC 循环下整车轻量化对油耗的影响

整车质量变化对燃油消耗量的影响

### 原因

整车质量变化对燃油消耗量的影响主要是通过整车行驶阻力变化实现的。车辆在行驶过程中，其总的行驶阻力为：

$$\Sigma F = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (1)$$

其中， $F_f$  滚动阻力，由式 (2) 确定：

$$F_f = mgf \quad (2)$$

$F_w$ ——空气阻力；

$F_i$ ——坡度阻力；

$F_j$ ——加速阻力，由式 (3) 确定：

定：

$$F_i = \delta m \frac{du}{dt} = 1 + \frac{1}{m} \frac{\Sigma I_w}{r^2} + \frac{1}{m} \frac{I_f i_g^2 \eta_r}{r^2} \quad (3)$$

$m$ ——整车质量 (kg)；

$f$ ——滚动阻力系数；

$\delta$ ——汽车旋转质量换算系数，

$$\delta > 1;$$

$\frac{du}{dt}$ ——车辆加速度 ( $m/s^2$ )；

$I_w$ ——车轮转动惯量 ( $kg \cdot m^2$ )；

$I_f$ ——飞轮转动惯量 ( $kg \cdot m^2$ )；

$i_g$ ——变速箱各档速比；

$i_0$ ——主减速比；

$\eta_r$ ——传动效率。

这里只考虑车辆在 NEDC 循环中的燃油消耗量，因此，坡度阻力可不考虑。由此可见在 NEDC 循环中，整车质量变化所影响的阻力分别为滚动阻力和加速阻力，其中在底盘测功机上，滚动阻力以载荷形式加载，加速阻力则根据车辆的质量分组以当量惯量的形式进行加载，由此最终形成对燃油消耗量测量结果的影响。

### 整车质量变化对燃油消耗量的影响分析

为了深入分析这一影响，本文就以下几款车型开展研究：

为了分析的更为全面，这里车辆类型选取了普通三相轿车和正处于市场快速发展的 SUV 车型；发动机形式分别选取了自然吸气发动机和涡轮增压发动机，其中把当前较为热门的 1.0T 机型也涵盖在内；此外车辆的质量变化分布涵盖了当前市场车型主要质量分布区间，包含了从 980kg 至 1880kg，共 8 个整车质量分组。

#### 分析方案

由于整车质量变化对行驶阻力的影响分为滚动阻力变化和加速阻力变化，结合 NEDC 循环中，底盘测功机的加载方式可知：当整车质量变化发生在法规规定的质量分组内时，只对滚动阻力产生影响；当质量变化超出单一法规规定的质量分组时，将同时对滚动阻力和加速阻力产生影响。因此具体验证分析方案如表 4 所示。

#### 分析结果

在 NEDC 循环中，各车型在不同

表 3 分析车辆相关信息

| 车型 | 车辆类型    | 整备质量 (kg) | 发动机形式     |
|----|---------|-----------|-----------|
| A  | 紧凑型轿车   | 1206      | 1.6L 自然吸气 |
| B  | 紧凑型 SUV | 1541      | 1.4T 涡轮增压 |
| C  | 紧凑型轿车   | 1050      | 1.0T 涡轮增压 |

质量以及不同的法规质量分组中对应的燃油消耗量结果如表 4 中最后一栏所示，可用图 3 的形式表示。

由图 3 的结果可见：

在同一法规质量分组范围内，整车燃油消耗量变化与质量变化呈线性关系，如式 (4) 所示，且对同一车型而言，斜率基本不变，近似为一常数；

$$Q = km + q_i \quad (4)$$

$Q$  ——车辆在 NEDC 循环下的燃油消耗量 (L/100km)；

$k$  ——关系式斜率；

$q_i$  ——初始燃油消耗量 (L/100km)，与车型及车型所处的法规质量分组有关。

仅当量惯量变化 (由跨法规质量分组所引起) 会导致各车型燃油消耗量发

生显著变化，且对同一车型而言，这一变化值为一常数。该变化使得在车型质量连续变化过程中，燃油消耗量呈阶梯状变化；

如表 5 所示，同一法规质量分组范围内，车辆的燃油消耗量变化量最大为 0.1L/100km，由当量惯量引起的燃油消耗量变化量最大为 0.14L/100km。当质量变化达到 110kg，即达到质量分组范围上限且引起质量分组跨档时，各车型对应的燃油消耗量变化量为 0.21 ~ 0.23L/100km。

对于当前处于常用质量范围内的乘用车而言，整车轻量化通常不超过 100kg (过多的轻量化将导致整车制造成本的显著增加)，通过前面的分析可见，在此范围内的轻量化对

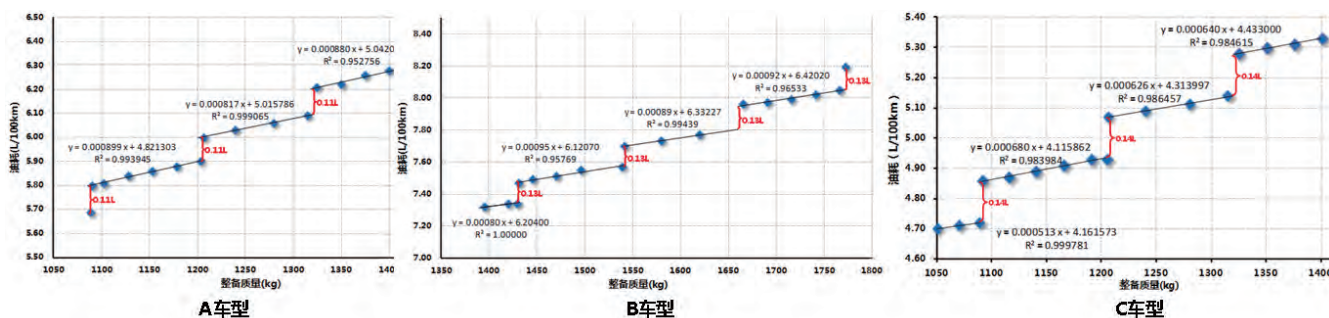


图 3 质量变化对各车型燃油消耗量的影响

表 4 验证分析方案

| 车型               | 法规质量分组(kg)       | 整车整備质量(kg) | 当量惯量(kg) | 分析目的 |  |  |      |        |        | NEDC 油耗仿真结果(L/100km) |
|------------------|------------------|------------|----------|------|--|--|------|--------|--------|----------------------|
| A                | 980 < CM ≤ 1090  | 1089       | 1140     |      |  |  |      |        | 当量惯量变化 | 5.69                 |
|                  | 1090 < CM ≤ 1205 | 1091       | 1250     |      |  |  |      |        | 质量变化   | 5.80                 |
|                  |                  | 1103       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 5.81   |                      |
|                  |                  | 1128       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 5.84   |                      |
|                  |                  | 1153       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 5.86   |                      |
|                  |                  | 1178       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 5.88   |                      |
|                  |                  | 1203       |          |      |  |  |      | 当量惯量变化 | 5.90   |                      |
|                  | 1205 < CM ≤ 1320 | 1206       | 1360     |      |  |  |      |        |        | 6.00                 |
|                  |                  | 1240       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 6.03   |                      |
|                  |                  | 1280       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 6.06   |                      |
|                  |                  | 1315       |          |      |  |  |      | 当量惯量变化 | 6.09   |                      |
|                  | 1320 < CM ≤ 1430 | 1325       | 1470     |      |  |  |      |        | 质量变化   | 6.21                 |
|                  |                  | 1350       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 6.22   |                      |
|                  |                  | 1375       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 6.26   |                      |
|                  |                  | 1400       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 6.28   |                      |
| 1430 < CM ≤ 1540 | 1425             | 1590       |          |      |  |  |      | 当量惯量变化 | 6.29   |                      |
|                  | 1431             |            |          |      |  |  |      | 6.41   |        |                      |
|                  | 1395             |            |          |      |  |  |      | 质量变化   | 7.32   |                      |
| B                | 1320 < CM ≤ 1430 | 1420       | 1470     |      |  |  |      | 质量变化   | 7.34   |                      |
|                  | 1430 < CM ≤ 1540 | 1429       | 1590     |      |  |  |      |        | 当量惯量变化 | 7.34                 |
|                  |                  | 1431       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 7.47   |                      |
|                  |                  | 1445       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 7.49   |                      |
|                  |                  | 1470       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 7.51   |                      |
|                  |                  | 1495       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 7.55   |                      |
|                  | 1540 < CM ≤ 1660 | 1539       | 1700     |      |  |  |      |        | 当量惯量变化 | 7.57                 |
|                  |                  | 1541       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 7.70   |                      |
|                  |                  | 1580       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 7.73   |                      |
|                  |                  | 1620       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 7.77   |                      |
|                  | 1660 < CM ≤ 1770 | 1665       | 1810     |      |  |  |      |        | 当量惯量变化 | 7.96                 |
|                  |                  | 1690       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 7.97   |                      |
|                  |                  | 1715       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 7.99   |                      |
|                  |                  | 1740       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 8.02   |                      |
|                  | 1770 < CM ≤ 1880 | 1765       | 1920     |      |  |  |      |        | 当量惯量变化 | 8.05                 |
| 1771             |                  |            |          |      |  |  | 质量变化 | 8.19   |        |                      |
| 1050             |                  |            |          |      |  |  |      | 质量变化   | 4.70   |                      |
| C                | 980 < CM ≤ 1090  | 1070       | 1130     |      |  |  |      |        | 4.71   |                      |
|                  | 1090 < CM ≤ 1205 | 1089       | 1250     |      |  |  |      |        | 质量变化   | 4.72                 |
|                  |                  | 1091       |          |      |  |  |      |        | 当量惯量变化 | 4.86                 |
|                  |                  | 1115       |          |      |  |  |      |        | 质量变化   | 4.87                 |
|                  |                  | 1140       |          |      |  |  |      |        | 质量变化   | 4.89                 |
|                  |                  | 1165       |          |      |  |  |      |        | 质量变化   | 4.91                 |
|                  |                  | 1190       |          |      |  |  |      |        | 质量变化   | 4.93                 |
|                  | 1205 < CM ≤ 1320 | 1204       | 1360     |      |  |  |      |        | 当量惯量变化 | 4.93                 |
|                  |                  | 1206       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 5.07   |                      |
|                  |                  | 1240       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 5.09   |                      |
|                  |                  | 1280       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 5.11   |                      |
|                  | 1320 < CM ≤ 1430 | 1315       | 1470     |      |  |  |      |        | 当量惯量变化 | 5.14                 |
|                  |                  | 1325       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 5.28   |                      |
|                  |                  | 1350       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 5.30   |                      |
|                  |                  | 1375       |          |      |  |  |      | 质量变化   | 5.31   |                      |
| 1400             |                  |            |          |      |  |  | 质量变化 | 5.33   |        |                      |



表5 车型燃油消耗量变化情况

| 车型 | 法规质量分组范围内最大燃油消耗量变化 (L/100km) | 当量惯量引起的燃油消耗量变化 (L/100km) |
|----|------------------------------|--------------------------|
| A  | 0.10                         | 0.11                     |
| B  | 0.10                         | 0.13                     |
| C  | 0.07                         | 0.14                     |

表6 实车验证情况

| 试验状态 | 试验质量 (kg) | 当量惯量 (kg) | 试验结果平均值 (L/100km) |
|------|-----------|-----------|-------------------|
| 状态 1 | 1175      | 1250      | 5.93              |
| 状态 2 | 1200      |           | 5.96              |
| 状态 3 | 1205      | 1360      | 6.06              |
| 状态 4 | 1275      |           | 6.15              |

车型燃油消耗量的最大改善量不超过 0.23L/100km。

#### 实车验证

采用 A 车型进行实车验证。验证车型参数如表 6 所示：

其中，结果采用两次试验有效结果的平均值。由于状态 2 和状态 3 的试验质量变化不大，因此，在试验过程中，在底盘测功机上采用了相同的道路阻力加载参数，因此两者不同状态下的试验结果差异可视为仅由于跨质量分组，加载不同的当量惯量所导致。由此可见实车验证结果与前面的分析结果一致。

### 整车轻量化对 CAFC 的影响

CAFC 值核算方法由下式 (5)、(6) 确定：

$$CAFC = \frac{\sum_{i=1}^N FC_i \times V_i}{\sum_{i=1}^N V_i \times W_i} \quad (5)$$

$$T_{CAFC} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i \times V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad (6)$$

$i$  ——乘用车车型序号；  
 $FC_i$  ——第  $i$  个车型的燃料消耗量；  
 $V_i$  ——第  $i$  个车型的年度生产或进口量；  
 $W_i$  ——第  $i$  个车型对应的倍数。  
 $T_i$  ——第  $i$  个车型对应燃料消耗量目标值；  
 $T_{CAFC}$  ——企业平均燃料消耗量目标值。

为使企业平均燃料消耗量达标，

$$CAFC \leq T_{CAFC}。$$

根据核算方法，考虑前面的分析结果，同时结合企业四阶段未来几年里的车型开发规划和潜在的轻量化实施方案进行整车轻量化对值影响的相关分析。

通过前面的分析有：

当整车轻量化所引起的车型质量变化在某一质量分组范围内时，该车型所对应的  $T_i$  保持不变，故  $T_{CAFC}$  也不变；而  $FC_i$  则由于车辆质量减少，根据式 (4)

发生相应减少，此时 CAFC 也将减小，该情况下对企业平均燃料消耗量达标是有利的；

当整车轻量化所引起的车型质量变化超出某一质量分组范围时，通常会跨一个质量分组，由图 2 可见，四阶段油耗法规下，相邻质量分组间的燃油消耗量目标值相差 0.2 ~ 0.3L/100km，即对应车型的  $T_i$  将加严 0.2 ~ 0.3L/100km。通过前文的分析可知，整车轻量化 100kg，最多可使 NEDC 工况下的燃油消耗量减小 0.23L/100km。而多数情况下，由于多方面因素的影响，当前许多车型的轻量化程度远小于 100kg，因此在这一情况下  $T_{CAFC}$  和 CAFC 会同时减小，但  $T_{CAFC}$  会比 CAFC 减小的更多，导致对企业平均燃料消耗量达标产生不利影响。

在四阶段法规条件下，整车轻量化对 CAFC 值的影响如图 4 所示。

对比整车轻量化前后和的变化情况可见：

整车轻量化可降低但同时也会同时降低；

整车轻量化过程中的下降量大于的下降量，由此导致值达标更加困难，需企业采取额外的技术措施和对策，由此导致企业成本的增加。

可见要使整车轻量化对值达标产生有利影响，应尽可能使整车在轻量化前后，其整备质量处于同一个法规质量分组范围内。但对于企业而言，通常一款上市车型会由若干不同级别的具体车型组成，这些具体车型的质量也有所差异，在实际设计开发过程中难以保证实施轻量化过程中，所有具体车型的整备质量

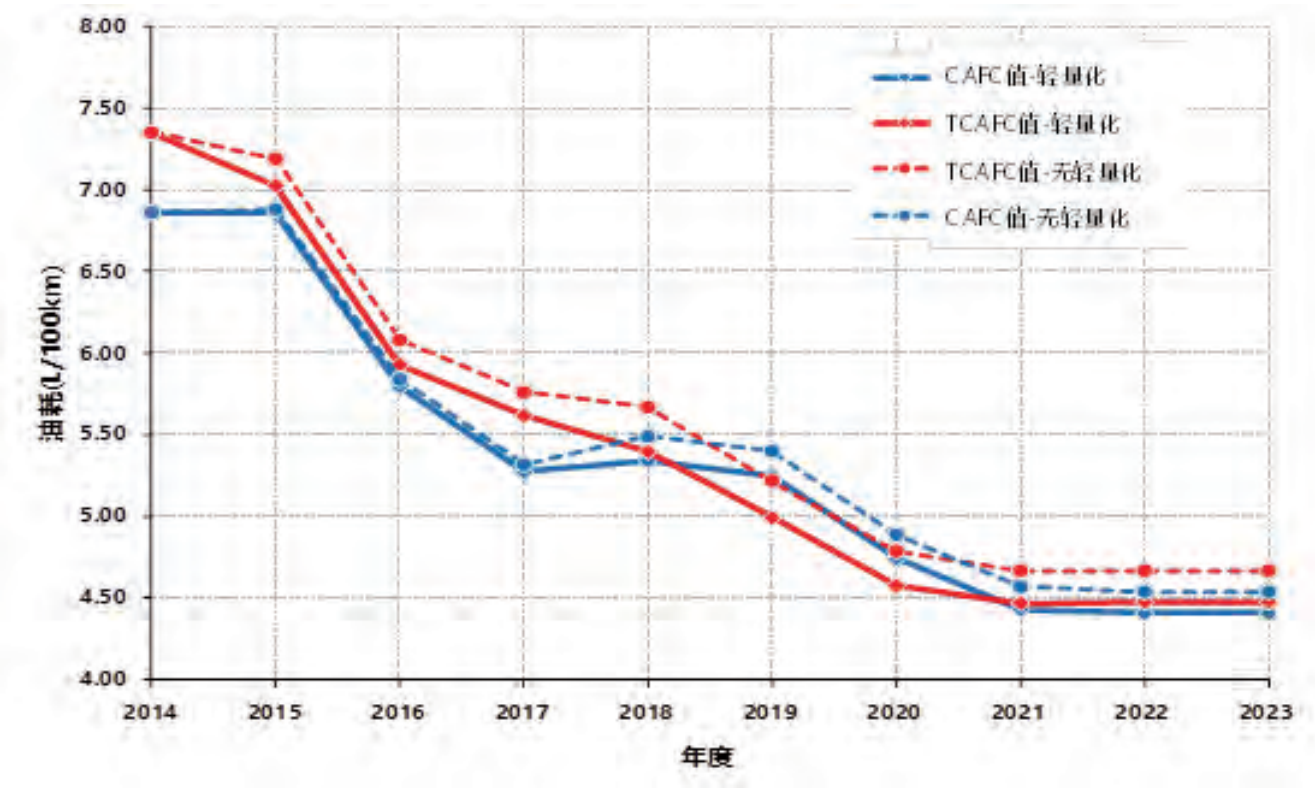


图4 轻量化对CAFC的影响

均不出现质量分组变化的情况。

## 结论及建议

通过对四阶段燃油消耗量法规的分析解读，对具体车型、动力总成在不同整车质量下的燃油消耗量变化量分析及根据上述分析开展具体核算案例有如下结论：

在同一法规质量分组范围内，整车轻量化措施对达标始终是有利的。

在当前市场车型通常所处的整车质

量范围内（1000 ~ 1800kg），同一质量分组内，轻量化对车型燃油消耗量的改善贡献最大为0.1L/100km，此外在跨质量分组范围时，相邻质量分组由当量惯量的不同带来的车型燃油消耗量差异为0.11 ~ 0.14 L/100km。

对企业而言，在四阶段油耗法规下，整车轻量化在降低值同时也会拉低，加大值和间的差距，因此，法规对企业整车轻量化措施的实施促动效果是极其有限的。

此外，在分析过程中也发现不同动力总成配置，整车轻量化对燃油消耗量的贡献略有差异，影响大小与发动机万有特性、车型工作区域发动机效率、轻量化后发动机效率变化梯度等有关，这些均需要在今后的工作中开展深入研究和分析。MFC