

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.04.022

# 基于行驶工况的货车动力传动系统优化

黄粉莲<sup>1</sup>, 纪威<sup>2</sup>, 申立中<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室, 云南 昆明 650500; 2. 中国农业大学 工学院, 北京 100083)

**摘要:** 为改善行驶工况下轻型货车的燃油经济性和污染物排放, 通过分析车辆循环百公里燃油消耗量、NO<sub>x</sub>和PM排放对主减速比、变速器各档传动比变化的敏感性, 提出一种基于敏感性系数确定指标权重系数的方法。以标准行驶工况下车辆循环百公里燃油消耗量、NO<sub>x</sub>和PM排放为目标, 对传动系统速比进行优化设计, 确定了综合目标较优的传动比组合。优化后综合百公里油耗降低0.112 4%, NO<sub>x</sub>排放降低0.158 7%, PM排放降低9.677%。研究结果可为轻型货车性能预测及动力传动系统的匹配优化提供参考。

**关键词:** 汽车工程; 动力传动系统; 优化; 行驶工况; 参数敏感性

中图分类号: U461.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)04-0142-07

## Optimization of Truck Powertrain Based on Driving Condition

HUANG Fen-lian<sup>1</sup>, JI Wei<sup>2</sup>, SHEN Li-zhong<sup>1</sup>

(1. Yunnan Provincial Key Laboratory of Internal Combustion Engines, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650500, China; 2. School of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To improve the fuel economy and pollutant emission of light-duty truck under real driving conditions, through the analysis of sensitivity of vehicle cycle fuel consumption per 100 km, NO<sub>x</sub> and PM emissions to the changes of final drive ratio and the gear ratios of transmission, a method for determining the weight coefficient of index based on sensitivity coefficients is put forward. Then, taking the minimum fuel consumption, NO<sub>x</sub> and particulate matter emissions under standard driving cycle as the optimum objective, the transmission ratio is optimized, and the optimal drive ratio combination is determined. After optimization, the cumulative fuel consumption per 100 km is reduced by 0.112 4%, the NO<sub>x</sub> emissions by 0.158 7% and the particulate matter emissions by 9.677%. The result of this study will provide a useful reference for the design and optimization of powertrain system of light-duty trucks.

**Key words:** automobile engineering; powertrain system; optimization; driving condition; parameter sensitivity

## 0 引言

汽车动力传动系统参数及控制规律是影响汽车动力性、燃油经济性和排放性能最重要的因素, 而行驶工况是汽车动力传动系统优化设计的参考依据<sup>[1-2]</sup>。行驶工况是车辆实际道路行驶状况的反映, 是考察某类车辆在某一特定地区的能源消耗量以及

污染物排放的评价标准和检测依据<sup>[3]</sup>。行驶工况对营运货车的污染物排放和燃油经济性影响很大, 完成不同循环时发动机的工作区域和工作状况不同, 燃烧和做功效率不同, 导致燃油消耗和污染物的生成有较大差异<sup>[4-5]</sup>。基于行驶工况对动力传动系统进行优化设计, 使车辆在实际运行过程中, 较多地工作于高效率区, 对改善动力传动系统的匹配、提

收稿日期: 2014-10-29

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAG13A04)

作者简介: 黄粉莲(1986-), 女, 云南昆明人, 博士。(hfenlian@126.com)

高车辆的燃油经济性、控制污染物排放都具有重要意义<sup>[6-7]</sup>。

### 1 行驶工况下车辆性能仿真分析

#### 1.1 行驶工况

国家标准 GB 18352.5—2013《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)》规定轻型柴油载货汽车排放测试必须在带有负荷和惯量模拟的底盘测功机上进行 I 型试验(常温下冷起动后排气污染物排放试验)。试验共持续 19 分 40 秒, 由两部分(1 部和 2 部)组成。试验 1 部由 4 个城区循环组成, 每个城区循环包含 15 个工况(怠速、加速、匀速、减速等); 试验 2 部由 1 个城郊循环组成, 该循环包含 13 个工况(怠速、加速、匀速、减速等)<sup>[8]</sup>。

#### 1.2 仿真模型验证

根据样本车辆(基本参数见表 1)发动机台架试验数据及车辆动力传动系统动力学关系<sup>[9]</sup>, 利用 MATLAB 平台建立货车动力传动系统仿真程序, 在行驶工况下对车辆循环百公里燃油消耗、碳烟(PM)排放、氮氧化物(NOx)排放特性进行仿真, 结果如图 1~3 所示。

表 1 样本车辆基本参数  
Tab. 1 Basic parameters of sample vehicle

参数	数值	参数	数值
发动机额定功率/kW	120	主减速器传动比	3.762 2
发动机额定转速/ (r · min <sup>-1</sup> )	3 600	车轮滚动半径/m	0.388
发动机最大扭矩/(N · m <sup>-1</sup> )	360	空气阻力系数	0.465
发动机 BSFC/ [g · (kW · h <sup>-1</sup> )]	≤205	迎风面积/m <sup>2</sup>	2.23
汽车整备质量/kg	1 860	最高车速/(km · h <sup>-1</sup> )	150
汽车总质量/kg	2 885	整车起步加速时间/s	14
变速器传动比	6.495:4.007: 2.316:1.426: 1:0.807	最大爬坡度/%	≥60
		综合燃油消耗 [L · (100 km) <sup>-1</sup> ]	8.1

图 1 为行驶工况下车辆循环百公里燃油消耗随车速变化的关系。由图可见, 行驶工况变化对车辆循环百公里燃油消耗影响显著, 每个循环车辆起步加速、急加速阶段瞬时百公里燃油消耗均很高, 且波动范围较大, 在低速加速区域达到峰值。车辆处于匀速行驶状态时, 瞬时百公里燃油消耗量与车速呈正线性相关。整个循环的平均燃油消耗为 8.004 L/(100 km), 与试验结果的相对误差仅为 1.23%。

图 2 为行驶工况下 NOx 瞬时质量排放浓度随车

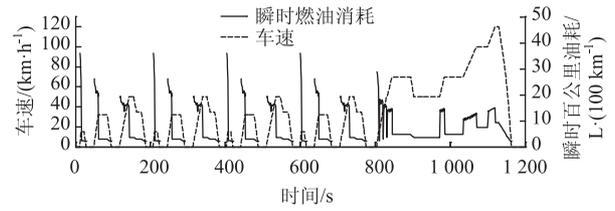


图 1 行驶工况下百公里油耗特性  
Fig. 1 Fuel consumption per 100 km under driving condition

速变化的关系。由图可见: NOx 瞬时质量排放浓度随工况变化关系明显, 车辆怠速时排放浓度稳定; 车辆加速时, NOx 排放浓度显著增大; 加速结束或车辆减速会导致 NOx 排放浓度迅速降低, 并有较大波动。车辆处于匀速行驶状态时, NOx 排放量基本与车速成正比关系, 这与文献 [10-11] 中的研究结果一致。NOx 排放随车速和加速度的增大而升高, 城郊循环工况的车速高于城区循环工况车速, 故城郊循环工况的 NOx 排放量明显高于城区循环工况, 其峰值也更高。

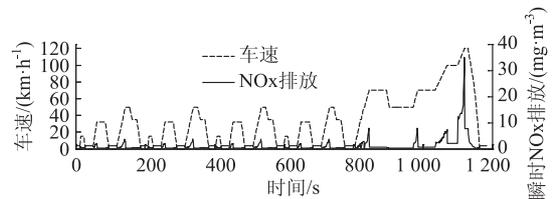


图 2 行驶工况下瞬时 NOx 排放特性  
Fig. 2 NOx instantaneous emission under driving condition

图 3 为行驶工况下碳烟瞬时排放量随工况变化的关系。由图可见, 车辆怠速时, 碳烟瞬时排放量维持在较低的水平, 排放峰值浓度基本都出现在剧烈的加速工况点上。车辆匀速行驶时, 碳烟排放较稳定, 排放量基本与车速成正比关系。碳烟瞬时排放量随车速和加速度的增加而逐渐变高, 在急加速过程中出现不规律的瞬时排放峰值。减速行驶过程碳烟排放有一定波动, 但总体排放量较低。

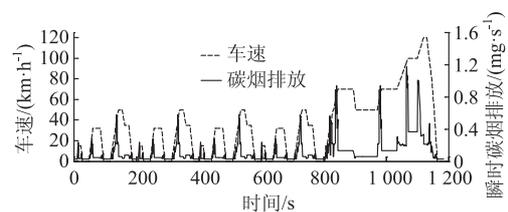


图 3 行驶工况下瞬时颗粒物排放特性  
Fig. 3 PM instant emission under driving condition

## 2 参数敏感性分析

敏感性是指由于特定因素变动而引起的评价指标的变动幅度或极限变化<sup>[12]</sup>。为了研究主减速比及变速器各档传动比变化对车辆循环百公里燃油消耗、NO<sub>x</sub> 排放、PM 排放的影响程度。在车辆其余参数保持不变的情况下，分别将每个变量变化  $\pm 10\%$  后对模型进行仿真，单一变量相对敏感性按下式计算：

$$(S_{f,x_0})_{rel} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \cdot \frac{x_0}{y_0}, \quad (1)$$

式中， $x_0$  为变量原始值； $y_0$  为原始变量参数下的目标值； $\Delta x$ ， $\Delta y$  为变量差值及目标差值。

图4为行驶工况下车辆百公里燃油消耗对主减速比与变速器各档传动比的相对敏感性。由图可见，百公里燃油消耗对传动比变化均不敏感，其中VI档传动比与主减速比对油耗的影响较大，VI档传动比增加10%，百公里油耗会增加1.17%；主减速比增加10%，则油耗增加0.89%。I，II，III档传动比对百公里燃油消耗的敏感性系数较小，说明油耗对I，II，III档传动比的变化均不敏感。IV，V档传动比对百公里油耗的相对敏感性系数为负值，即其与百公里油耗的关系为负相关，IV，V档传动比增加10%，则百公里燃油消耗分别降低0.14%，0.26%。

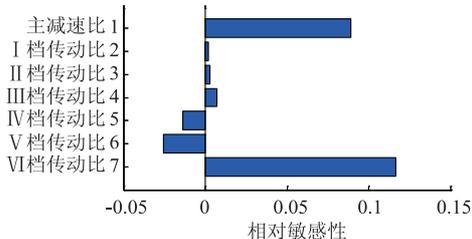


图4 传动比对燃油消耗的相对敏感性

Fig. 4 Sensitivity of transmission ratio to fuel consumption

图5为车辆NO<sub>x</sub>排放对主减速比与变速器各档传动比的相对敏感性。由图可见，NO<sub>x</sub>排放对VI档传动比的变化最敏感，二者的关系为负相关，即VI档传动比增加10%，NO<sub>x</sub>排放可降低2.45%。主减速比与IV档传动比对NO<sub>x</sub>排放的影响程度次之，IV档传动比增加10%，会导致NO<sub>x</sub>排放增加1.17%。主减速比与NO<sub>x</sub>排放的关系为负相关，主减速比增加10%，NO<sub>x</sub>排放可降低1.04%。I，II，III，V档传动比对NO<sub>x</sub>排放的影响均较小。在满足传动比分配约束条件下，适当增加主减速比与VI档传动比，降低IV，V档传动比，对降低NO<sub>x</sub>排放效果显著。

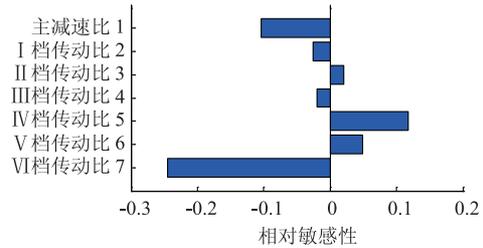


图5 传动比对NO<sub>x</sub>排放的相对敏感性

Fig. 5 Sensitivity of transmission ratio to NO<sub>x</sub> emission

图6为车辆碳烟排放对主减速比与变速器各档传动比的敏感性。由图可见，碳烟排放对主减速比与V档传动比的变化最敏感，其关系均为负相关，即V档传动比和主减速比分别增加10%，碳烟排放可分别降低23.27%，22.17%。IV档传动比对碳烟排放的影响程度次之，IV档传动比增加10%，会导致碳烟排放增加4.96%。II档传动比增加10%，碳烟排放会增加1.59%。I，III，VI档传动比与碳烟排放的关系均为负相关，I，III，VI档传动比增加10%，碳烟排放分别可减少0.033%，3.24%，0.218%。优化设计过程中，适当增加主减速比和V档传动比、降低IV传动比，对控制PM排放具有重要意义。

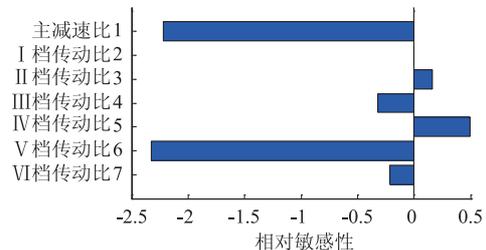


图6 传动比对颗粒物排放的相对敏感性

Fig. 6 Sensitivity of transmission ratio to PM emission

## 3 传动比优化

### 3.1 优化设计变量

在不改变整车主要配置的条件下，对传动系统的传动比进行优化设计是较为简单、可行的优化方案。本文以主减速比及变速器各档传动比为优化变量，行驶工况下百公里燃油消耗、PM排放及NO<sub>x</sub>排放量为优化目标，对传动系统进行多目标、多属性优化设计。样本车型配备的6档自动变速器的V档为直接档，其传动比为1，无需进行优化，则优化设计变量的矩阵为：

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [i_0, i_{g1}, i_{g2}, i_{g3}, i_{g4}, i_{g6}]^T, \quad (2)$$

式中,  $i_0$  为主减速比;  $i_{gk}$  为变速器第  $k$  档传动比。

### 3.2 优化目标函数

对主减速比及变速器各档传动比进行优化设计的目标是从传动比分配组合的可行解集中求出最优解, 优化问题可描述为: 令  $\Omega = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  为所有满足约束条件的传动比组合构成的解空间,  $F(X_j)$  为组合  $X_j$  对应的目标函数值, 要求寻找最优解  $X^*$ , 使得对于所有的  $X_j \in \Omega$ , 有  $F(X^*) = \min F(X_j)$ 。

由于优化指标中行驶工况下百公里燃油消耗量、NOx 排放及 PM 排放存在量纲、数量级不统一的问题, 需将各分目标函数转化为无量纲、等量级的目标函数。

假设  $Q_s(X)$  为传动比分配组合的可行解集  $\Omega$  中任意传动比组合  $X$  对应的循环百公里燃油消耗量, 存在最优解  $X^*$ , 使得对于所有的  $X_j \in \Omega$ , 有  $Q_s(X^*) = \min Q_s(X)$ 。则此时车辆的循环百公里燃油消耗量最小, 即燃油经济性最佳。将  $Q_s(X^*)$  记为  $Q_{s,\min}$ , 建立汽车循环百公里燃油消耗分目标函数表达式为:

$$f_{Q_s}(X) = \frac{Q_s(X)}{Q_{s,\min}} \quad (3)$$

由  $f_{Q_s}(X)$  的定义可知, 当车辆动力传动系统达到循环百公里燃油消耗最低的配置时, 其百公里油耗等于汽车最佳燃油经济性时的油耗, 即:  $Q_s(X) = Q_{s,\min}$ , 百公里燃油消耗分目标函数  $f_{Q_s}(X) = 1$ 。其余情况下百公里燃油消耗均大于最佳燃油经济性时的油耗, 即  $Q_s(X) > Q_{s,\min}$ 、 $f_{Q_s}(X) > 1$ , 则此时汽车的燃油经济性差一些。因此,  $f_{Q_s}(X)$  值越小, 且越接近于 1, 说明汽车的综合百公里燃油消耗越低、燃油经济性越好。

同理, 对 NOx 排放和 PM 排放分目标进行归一化处理, 得到 NOx 排放分目标函数:

$$f_{NO_x}(X) = \frac{R_{NO_x}(X)}{(R_{NO_x})_{\min}} \quad (4)$$

碳烟排放分目标函数:

$$f_{PM}(X) = \frac{R_{PM}(X)}{(R_{PM})_{\min}} \quad (5)$$

式中,  $R_{NO_x}(X)$ ,  $R_{PM}(X)$  分别为车辆任意动力传动系统配置方案下的 NOx 及 PM 排放量;  $(R_{NO_x})_{\min}$ ,  $(R_{PM})_{\min}$  为最低排放量。同理,  $f_{NO_x}(X)$ ,  $f_{PM}(X)$  的值越小, 且越接近于 1, 则汽车的排放性越好。

结合上述对经济性与排放性分目标函数的处理, 将 3 个优化设计分目标函数按照其值的数量级和在

整体设计中的重要程度相应地给出一组加权因子 (权重系数)  $\omega_i$ , 取  $f_i(X)$  与  $\omega_i$  的线性组合, 构成一个统一的目标函数  $F(X)$ , 即:

$$F(X) = w_1 f_{Q_s}(X) + w_2 f_{NO_x}(X) + w_3 f_{PM}(X),$$

式中,  $w_1$  为经济性权重系数;  $w_2$  为 NOx 排放权重系数;  $w_3$  为 PM 排放权重系数。

### 3.3 权重系数确定

在多属性决策分析中, 通常采用权重来表示属性的相对重要性<sup>[13]</sup>。确定权重系数的方法很多, 如主观赋权法、特征向量法、最小平方和法、熵值法、层次分析法、主成分分析法等<sup>[14]</sup>, 每种方法各有优缺点, 需根据具体优化问题选用。本文优化指标关系复杂、指标之间的重要性难于科学定性, 因此从各指标对目标模型的效应出发, 根据变量对指标的敏感性分析结果确定各指标的权重系数。

敏感性系数的大小和符号反映变量变化对指标变化的影响程度和方向, 敏感性系数为正表示设计变量与指标的关系为正相关, 即设计变量增大指标也相应增大; 敏感性系数为负则表示负相关, 即设计变量增大, 指标减小。敏感性系数绝对值越大的参数变化会造成指标越大幅度的变化, 属于敏感变量, 则目标变化时允许该参数变化的幅度要小<sup>[15]</sup>。对各参数允许升降幅度的分析, 实质上是各变量对指标影响程度分析的反向推算, 在计算上表现为敏感性系数绝对值的倒数<sup>[16]</sup>。

假设指标  $i$  ( $i = 1, 2, 3$  分别对应  $Q_s$ , NOx, PM) 允许设计变量  $x_k$  变化的幅度为:

$$\varepsilon_i(x_k) = \frac{1}{|S_{x_k}|} \quad (6)$$

则设计变量  $X$  对指标  $i$  的综合效应值为:

$$a_i = \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(x_k) = \sum_{k=1}^n \left( \frac{1}{|S_{x_k}|} \right) \quad (7)$$

式中,  $n$  为优化变量个数;  $S_{x_k}$  为第  $k$  个变量对指标的敏感性系数;  $a_i$  值的大小表示  $X$  使分目标函数  $f_i(X)$  收益的大小, 即  $X$  使  $f_i(X)$  降低的程度。

将  $a_i$  归一化处理, 可得权重系数:

$$w_i = a_i / \sum_{j=1}^3 a_j \quad (8)$$

式中,  $w_1$  满足  $\sum w_i = 1$ , 且  $0 < w_i < 1$ 。

单个设计变量  $x_k$  对指标的敏感性系数  $S_{x_k}$  越大, 则指标允许该设计变量变化的幅度越小。各设计变量对指标的综合效应值越大, 则该指标在综合目标中的重要程度越大 (例如: 若  $X$  使百公里燃油消耗  $F_{Q_s}(X)$

降低的程度越大,则 $f_{Q_s}(\mathbf{X})$ 对综合目标函数 $F(\mathbf{X})$ 降低的贡献越大,则可对 $f_{Q_s}(\mathbf{X})$ 赋予较大权重)。

将各优化设计变量对指标的敏感性系数代入式(7)计算设计变量对各指标的效应值 $a_i$ ,再将结果代入式(8)计算可得各指标的权重系数如表2所示。

表2 指标权重系数  
Tab.2 Weight coefficients of indexes

指标	综合效应值	权重系数
百公里油耗	$a_1 = 8.576\ 0$	$w_1 = 0.654\ 2$
NOx 排放	$a_2 = 4.081\ 6$	$w_2 = 0.311\ 4$
PM 排放	$a_3 = 0.451\ 1$	$w_3 = 0.034\ 4$

### 3.4 约束条件

在优化设计过程中,优化目标的实现通常受到实际情况或设计变量间的相互关系和取值边界限制,这种限值称为约束条件。本文的燃油经济性和排放性综合目标函数约束条件包括<sup>[9]</sup>:各档间速比的间隔要求、直接档最大动力因数约束、最大传动比要求、最大爬坡度的要求、道路附着条件、最高车速要求、发动机转速及转矩范围限制等。

### 3.5 优化计算

本文研究的是一个具有6个设计变量,12个约束条件的最优化问题,其数学模型如下:

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{X}) \\ \mathbf{X} \in \{g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m\} \\ \mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_6]^T \end{cases} \quad (9)$$

该模型是多属性非线性约束优化问题,优化的目标是求函数 $F(\mathbf{X})$ 的最小值,且函数值越小,优化效果越好。根据优化模型的特点,本文选择信赖域算法<sup>[17-18]</sup>求解优化问题。

#### 3.5.1 单目标优化

基于上述优化变量、优化目标函数、指标权重及优化算法选择的理论分析与研究,利用 Matlab 编程对优化问题进行求解。首先对各评价指标进行单目标优化,以确定指标的最优解及参数优化极限,优化结果如表3所示。

由表3可知,对车辆百公里燃油消耗进行单目标优化时,经济性权重系数 $w_1 = 1$ , $w_2, w_3 = 0$ 。优化结果表明:在整车其余部件配置不变的条件下,通过调整传动系统传动比,该车型标准行驶工况下能达到的最低综合燃油消耗为 $Q_{s, \min} 7.854\ 2\ \text{L}/(100\ \text{km})$ 。同理,对NOx与PM排放进行单目标优化,可得最

表3 单一目标优化结果

Tab.3 Optimization result of single objective

目标及变量优化结果	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_1$	$w_2$	$w_3$
	1	0	0	0	1	0	0	0	1
燃油消耗/[L·(100 km <sup>-1</sup> )]	7.845 2			7.951 9			8.168 8		
NOx 排放/(g·km <sup>-1</sup> )	0.380 27			0.360 84			0.446 75		
PM 排放/(g·km <sup>-1</sup> )	0.011 21			0.011 650			0.010 629		
最大爬坡度/%	68.94			63.28			77.38		
最高车速/(km·h <sup>-1</sup> )	186.16			179.89			143.98		

低 NOx 排放 ( $R_{\text{NOx}})_{\min} = 0.360\ 8\ \text{g}/\text{km}$ , 最低 PM 排放 ( $R_{\text{PM}})_{\min} = 0.010\ 63\ \text{g}/\text{km}$ 。

#### 3.5.2 多目标优化

由单一目标优化确定 $Q_{s, \min}$ , ( $R_{\text{NOx}})_{\min}$ , ( $R_{\text{PM}})_{\min}$ 后,可知综合优化目标函数表达式为:

$$F(\mathbf{X}) = w_1 \frac{Q_s(x)}{7.845} + w_2 \frac{R_{\text{NOx}}(x)}{0.360\ 8} + w_3 \frac{R_{\text{PM}}(x)}{0.010\ 63}$$

根据表2中已确定的指标权重系数 $w_1, w_2, w_3$ 及选取的优化算法进行多次迭代即可求出使综合目标函数最小的百公里燃油消耗量 $Q_s$ 、NOx 排放量 $R_{\text{NOx}}$ 及 PM 排放量 $R_{\text{PM}}$ 。利用 Matlab 编程求解上述优化问题,优化前后目标的对比如表4所示。

表4 优化前后目标结果对比

Tab.4 Comparison of performance before and after optimization

指标	优化前	优化后	相对变化量/%
燃油消耗/[L·(100 km <sup>-1</sup> )]	8.004	7.995	-0.112 4
NOx 排放/(g·km <sup>-1</sup> )	0.378 1	0.377 5	-0.158 7
PM 排放/(g·km <sup>-1</sup> )	0.012 4	0.011 2	-9.677
最大爬坡度/%	71.03	73.10	2.916
最高车速/(km·h <sup>-1</sup> )	168.97	167.64	0.79

由表4可知,优化后综合百公里油耗降低0.112 4%, NOx 排放降低0.158 7%, PM 排放降低9.677%, 百公里油耗与 NOx 排放略有改善, PM 排放有较大幅度的降低。鉴于我国目前大范围内的雾霾重度污染,严格控制汽车 PM 排放以改善空气质量刻不容缓。该优化结果能在大幅降低 PM 排放的同时,对燃油经济性和 NOx 排放略有改善的,优化设计合理、可行。由于优化后主减速比有较大幅度增加(3.3%),最大传动比 $i_{0i_{g1}}$ 及最小传动比 $i_{0i_{g6}}$ 均增大,优化后车辆动力性有明显提高,最大爬坡度增加2.916%,最高车速降低0.79%,这对于提高货车动力性能具有重要现实意义。

## 4 结论

本文通过研究车辆在标准行驶工况下的百公里燃油消耗、NO<sub>x</sub> 和 PM 排放性能, 分析传动系速比变化对目标的影响程度, 提出一种基于敏感性分析结果确定指标权重系数的方法, 以标准行驶工况下车辆最低燃油消耗、最低 NO<sub>x</sub> 和 PM 排放为目标, 对传动系统主减速比、变速器各档传动比进行优化设计, 确定了使目标较优的动力传动系统配置。主要结论如下:

(1) 车辆综合百公里燃油消耗、NO<sub>x</sub> 及 PM 排放对行驶工况的变化敏感影响显著, 其值与车速、加速度密切相关。车辆加速、急加速阶段燃油消耗与污染物排放均急剧增加, 且在加速区域达到峰值。

(2) 百公里燃油消耗、NO<sub>x</sub> 和 PM 排放, 3 个指标相互影响, 彼此牵制, 权重系数分配不同, 优化结果差异很大。本文提出的优化方案能在 3 个优化指标中取得较好的折衷, 优化后燃油消耗、NO<sub>x</sub> 排放有所改善, PM 排放则有较大幅度降低。

(3) 不同货车消费者对车辆使用性能需求不同、且不同地区的排放法规要求各异, 因此可根据专家经验或车辆具体性能要求, 对各指标的权重系数进行调整, 以满足车辆的多样化、个性化需求。

### 参考文献:

### References:

- [1] BAGLIONE M L, DUTY M J. Development of Reverse Dynamic Optimization Methodology for Optimal Powertrain Integration and Control Design [C] // Proceedings of the ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Brooklyn: ASME, 2008: 1-10.
- [2] MARIA I. Fuel Optimal Powertrain Control for Heavy Trucks Utilizing Look Ahead [D]. Linköping: Linköpings University, 2009: 3-10.
- [3] 李忠剑, 张俊智, 卢青春, 等. 运用特征参数对汽车驾驶循环的研究 [J]. 汽车技术, 2001(7): 13-16.  
LI Zhong-jian, ZHANG Jun-zhi, LU qing-chun, et al. Study on Automotive Driving Cycle by Using Characteristic Parameters [J]. Automobile Technology, 2001 (7): 13-16.
- [4] 孙宏图. 基于循环工况的城市公交客车动力传动系统参数研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009: 2-8.  
SUN Hong-tu. Study on Parameters of Power Train for Urban Bus Based on Driving Cycles [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009: 2-8.
- [5] KULKARNI N C, JADHAV N, NANDKEOLYAR K. Drive Cycle for Commercial Vehicles for Selection of Power Train to get Optimum Fuel Efficiency [EB/OL]. [2014-10-20]. <http://papers.sae.org/2009-01-2886>.
- [6] BAGLIONE M L, DUTY M J. Reverse Dynamic Optimization of Variable Displacement Engine Operation and System Integration [C] // Proceedings of 2008 ASME Dynamic Systems and Control Conference. Ann Arbor: ASME, 2008: 1-8.
- [7] HUAJIE D, XIUMIN Y, JUNJIE L. et al. Study on Effects of Driving Style on Vehicle Performance for Econopower Competition [EB/OL]. [2014-10-20]. <http://papers.sae.org/2008-01-1781>.
- [8] GB 18352.5—2013, 轻型汽车污染物排放限值及测量方法 [S].  
GB 18352.5—2013, Limits and Measurement Methods for Emissions from Light-duty Vehicles [S].
- [9] 黄粉莲. 营运货车动力传动系统仿真优化 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 98-100.  
HUANG Fen-lian. Simulation and Optimization of Commercial Truck Powertrain System [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014: 98-100.
- [10] 高继东, 秦孔建, 梁荣亮. 北京道路工况下公交车 PM 和 NO<sub>x</sub> 排放特性试验研究 [J]. 汽车工程, 2011, 33(9): 757-760.  
GAO Ji-dong, QIN Kong-jian, LIANG Rong-liang. An Experimental Study on the PM and NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of Public Bus in Real Driving Condition in Beijing [J]. Automotive Engineering, 2011, 33 (9): 757-760.
- [11] 陈晓明, 宁智, 宋云超, 等. 重型柴油车道路循环工况下排放特性的仿真分析 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(1): 109-115.  
CHEN Xiao-ming, NING Zhi, SONG Yun-chao, et al. Simulation on the Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle under Transient Driving Cycle [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32 (1): 109-115.
- [12] 蒋艳, 向学军, 李宁. 多目标决策中的权重敏感性分析 [J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2004, 26(5): 447-449.  
JIANG Yan, XIANG Xue-jun, LI Ning. Study on Weights Sensitivity of Multi-Objective Decision-making [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences Edition, 2004, 26 (5): 447-449.
- [13] 杨保安, 张科静. 多目标决策分析: 理论、方法与应用研究 [M]. 上海: 东华大学出版社, 2008: 19-31.

- YANG Bao-an, ZHANG Ke-jing. Multi Objective Decision-making Analysis: Theory, Method and Application [M]. Shanghai: Donghua University Press, 2008: 19-31.
- [14] 王清. 多属性评价的权重敏感性度量及分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006: 8-14.
- WANG Qing. Weight Sensitivity Measurement and Analysis of Multi-criteria Evaluations [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006: 8-14.
- [15] 蒋艳, 陈荣秋. 基于权重最小变化量的参数敏感性分析 [J]. 武汉理工大学学报, 信息与管理工程版, 2005, 27 (1): 165-167.
- JIANG Yan, CHEN Rong-qiu. Parameter Sensitivity Analysis Based on the Least Variance of Weights [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering Edition, 2005, 27 (1): 165-167.
- [16] 蒋根谋, 刘荣自. 基于敏感性分析的房地产风险投资多目标决策 [J]. 商场现代化, 2011, 635 (2): 117-118.
- JIANG Gen-mou, LIU Rong-zi. Multi Objective Decision-making of Risk for Real Estate Investment Based on Sensitivity Analysis [J]. Market Modernization, 2011, 635 (2): 117-118.
- [17] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 94-206.
- GONG Chun, WANG Zheng-lin. Proficient in MATLAB Optimization Calculation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 94-206.
- [18] 陈宝林. 最优化理论与算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 315-320.
- CHEN Bao-lin. Optimization Theory and Algorithm [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 315-320.
- 
- (上接第 101 页)
- [8] XIA Yong, CHEN Bo, WENG Shun, et al. Temperature Effect on Vibration Properties of Civil Structures: A Literature Review and Case Studies [J]. Journal of Civil Structure Health Monitoring, 2012, 2 (1): 29-46.
- [9] GONZALEZ I. Application of Monitoring to Dynamic Characterization and Damage Detection in Bridges [D]. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2014.
- [10] ZHOU G D, YI T H. A Summary Review of Correlations between Temperatures and Vibration Properties of Long-span Bridges [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, Article ID 638209: 19.
- [11] 孙晓丹, 欧进萍. 基于小波包和概率主成份分析的损伤识别 [J]. 工程力学, 2011, 28 (2): 12-17.
- SUN Xiao-dan, OU Jin-ping. Structural Damage Identification Based on Wavelet Packet Energy and PPCA [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28 (2): 12-17.
- [12] 吴森, 韦灼彬. 基于小波包能量谱和因子分析的结构损伤识别方法 [J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2011, 12 (5): 12-17.
- WU Sen, WEI Zhuo-bin. Method of Structural Damage Identification Based on Wavelet Packet Energy Spectrum and Factor Analysis [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 12 (5): 12-17.
- [13] KRAMER M A. Nonlinear Principal Component Analysis Using Autoassociative Neural Networks [J]. AIChE Journal, 1991, 37 (2): 233-243.
- [14] 王修勇, 温青, 杨琪, 等. 基于新奇检测技术的斜拉索状态评估 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (9): 53-59, 118.
- WANG Xiu-yong, WEN Qing, YANG Qi, et al. Condition Assessment for Stay Cables of Cable-stayed Bridge Based on Novelty Detection Technique [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (9): 53-59, 118.
- [15] GUL M. Investigation of Damage Detection Methodologies for Structural Health Monitoring [D]. Orlando, Florida: University of Central Florida, 2009.
- [16] YAN A M, KERSCHEN G, BOE P D, et al. Structural Damage Diagnosis under Varying Environmental Conditions—Part I: A Linear Analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19 (4): 847-864.