DOI: 10.3901/JME.2021.20.153

基于能量计算模型的混合动力商用车节油分析*

曾小华 刘持林 宋大风 李文远

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130025)

摘要: 针对混合动力商用车工作模式多、油耗分析耦合因素多且复杂的问题,从系统能量流角度出发,建立基于能量计算的混合动力系统理论油耗计算模型和综合理论油耗增量计算模型,并通过不同案例的仿真与理论计算结果的对比分析来验证所建立的理论计算模型的合理性,对比分析结果表明所提的理论计算模型误差在4%以内。此外,基于能量计算模型推导出混合动力商用车各油耗影响因素的理论节油量及节油率公式,分别对各油耗影响因素进行定性和定量分析,特别定量计算滚动阻力系数、电机效率、机械效率及发动机平均燃油消耗率变化后混合动力商用车节油能力的变化。所建立的理论计算模型简化了混合动力系统能量分析复杂的问题,对混合动力商用车前期匹配设计和经济性摸底具有一定的借鉴作用。

关键词: 混合动力系统; 理论油耗模型; 商用车; 节油分析

中图分类号: U469

Fuel Saving Analysis of Hybrid Truck Based on Energy Calculation Model

ZENG Xiaohua LIU Chilin SONG Dafeng LI Wen Yuan

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025)

Abstract: Aiming at the problems of multiple working modes of hybrid truck and multiple coupling factors of fuel consumption analysis, a theoretical fuel consumption calculation model and a comprehensive theoretical fuel consumption incremental calculation model is established based on energy calculation from the perspective of system energy flow in this paper. The rationality of the theoretical calculation model established in this paper is verified through comparative analysis of simulation and theoretical calculation results of different cases. The comparative analysis results show that the error of the theoretical calculation model proposed in this article is within 4%. In addition, based on the energy calculation model, the theoretical fuel-saving amount and fuel-saving rate formulas of various fuel consumption influencing factors of hybrid truck are derived, and the various fuel consumption influencing factors are respectively analyzed qualitatively and quantitatively. In particular, the changes in the fuel-saving ability of hybrid truck after changes in rolling resistance coefficient, motor efficiency, mechanical efficiency, and engine average fuel consumption rate are specifically calculated. The theoretical calculation model established in this paper simplifies the complex problems of hybrid system energy analysis, and can be used as a reference for the preliminary matching design and economic analysis of hybrid truck.

Key words: hybrid electric system; theoretical fuel consumption model; commercial truck; fuel saving analysis

0 前言

石油资源的匮乏和环保法规的严苛是制约汽车工业发展的瓶颈^[1],混合动力汽车以其节油效果明显、排放良好及续驶里程长的优点发展迅速^[2]。目

前针对混合动力系统的油耗分析与节能优化研究较多,但从能量的角度对混合动力系统各油耗影响因素的节能效果缺少深入的研究。

国内学者通过论述混合动力汽车的节油机理,揭示了其四种节油途径^[3],根据仿真结果定性分析混合动力系统各途径的节油效果^[4],并阐述了混合动力车辆的节油措施^[5];国外学者在建立简化的油耗预测模型^[6]、优化控制策略^[7]、优化仿真工况^[8]、提高传动系统效率^[9]等方面对混

* 吉林省自然科学基金资助项目(YDZG202101ZYTS159)。20200607收到初稿,20210629收到修改稿

合动力汽车的节油潜力进行了深入的探讨。此外,关于混合动力系统构型^[10]和关键控制参数^[11]等对油耗的影响以及基于优化控制理论^[12-13]实现混合动力系统经济性能提升方面也有较多学者研究。

上述研究多是基于仿真分析混合动力系统所能达到的节油效果,或是通过优化控制、改进构型实现节油,并没有从根源揭示复杂混合动力系统的节油因素及其对油耗的影响规律。由于混合动力汽车是一个多动力源强耦合系统^[14],从理论根源说明复杂混合动力系统各节能因素对经济性影响,并揭示混合动力系统的节油规律是行业共同关注的问题^[15]。本文基于商用卡车混合动力系统,从卡车内部能量流的角度出发,提出了平均综合传动效率概念,建立理论油耗计算模型和综合油耗增量计算模型,并基于能量计算模型推导出商用卡车各油耗影响因素的节油量和节油率,探究其变化后的节油规律。该方法基于系统内部能量流定量分析了混合动力系统的节油机理,通过分析各油耗影响因素总结出商用卡车的节油规律,简化了混合动力系统能量计算方法,对混合动力汽车设计和经济性评价具有一定的借鉴作用。

1 能量计算模型

1.1 整车基本参数

针对商用车的使用条件,综合成本和可靠性是其开发研究的关键考虑因素,并联 P1 轻混系统以其构型简单、开发成本低及可靠性好的优点成为商用车混合化的趋势之一。某并联构型商用卡车混合动力系统,如图 1 所示,发动机后通过 PTO 取力器与 ISG 电机相连,PTO 在离合器之前,系统属于 P1 构型,ISG 电机具有怠速启停、再生制动和辅助驱动的功能,整车基本参数如表 1 所示。

图 1 P1 构型

表 1 整车基本参数

参数	数值
整车质量/kg	46 000
车轮半径/m	0.526
滚阻系数	0.007
迎风面积/m ²	8
空气阻力系数	0.565 1
发动机峰值功率/kW	260
ISG 电机峰值功率/kW	100
动力电池容量/(A·h)	50
动力电池电压/V	384
主减速器速比	4.111

1.2 理论油耗计算模型

文中基于 P1 构型商用卡车内部能量流,提出基于能量计算的混合动力系统理论油耗计算模型。首先, P1 构型商用卡车可以按照图 2 所示,划分为动力源模块、传动系统模块以及车体模块。

图 2 基于系统能量流角度混合动力商用车模块划分

其中动力源模块由发动机和电池组成,传动系统模块由电机以及变速机构组成,车体模块根据汽车理论简化为整车纵向动力学模型,如式(1)所示

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

式中, F_t 表示车轮处整车驱动力, F_f 表示滚动阻力, F_w 表示空气阻力, F_i 表示坡道阻力, F_j 表示加速阻力, 单位均为 $N \cdot m$ 。

图 2 所示为 P1 构型商用卡车内部不同节点位置的能流定义, 其中车轮处循环工况理论总驱动能量 E_{wh} 如式(2)所示

$$E_{wh} = \sum_{i=0}^n \begin{cases} F_t(t) \times v(t) / 1000 & F_t(t) > 0 \\ 0 & F_t(t) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $F_t(t)$ 表示循环工况各点需求驱动力, $N \cdot m$; $v(t)$ 表示循环工况各点车速, m/s 。

发动机消耗燃油总能量 E_{fuel} 如式(3)所示

$$E_{fuel} = \frac{f_{e,c} \cdot Calori}{3\,600C} \quad (3)$$

式中, $f_{e,c}$ 表示整车百公里燃油消耗, $L/100\ km$;

$Calori$ 表示燃油热值, kJ/g ; C 表示油耗单位转换系数, 其计算如式(4)所示

$$C = \frac{1}{36\,000 \rho_{\text{fuel}} \cdot x_{\text{tot}}} \quad (4)$$

式中, ρ_{fuel} 表示燃油密度, kg/L ; x_{tot} 表示循环工况总行驶里程, km 。

发动机实际提供的能量 E_{ice} 如式(5)所示

$$E_{\text{ice}} = \frac{f_{e,c}}{C \cdot b_{e,\text{avg}}} \quad (5)$$

式中, $b_{e,\text{avg}}$ 表示发动机平均燃油消耗率, $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 其计算如式(6)所示

$$b_{e,\text{avg}} = \sum_{t=0}^n \left\{ \frac{Me(t)}{\sum_{t=0}^n Pe(t)} \right\} \quad (6)$$

式中, $Me(t)$ 表示循环工况各点发动机喷油量, g/h ; $Pe(t)$ 表示循环工况各点发动机输出功率, kW 。

电池端再生制动总回收能量 E_{rgb} 如式(7)所示

$$E_{\text{rgb}} = \sum_{t=0}^n \begin{cases} \max \left\{ 0, [\Delta \text{SOC}(t) - \Delta \text{SOC}(t-1)] \right\} & \text{BatE} \times 3\,600 \\ & BrkPedal(t) > 0 \\ 0 & BrkPedal(t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\Delta \text{SOC}(t)$ 表示循环工况各点对应的系统 SOC 变化; $BrkPedal(t)$ 表示循环工况各点制动踏板开度; $BatE$ 表示电池能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

电池放电总能量 $E_{\text{bat_dischrg}}$ 如式(8)所示

$$E_{\text{bat_dischrg}} = \max \left\{ 0, (\text{SOC}_{\text{ini}} - \text{SOC}_{\text{end}}) \right\} \quad (8)$$

式中, SOC_{ini} 表示电池初始 SOC; SOC_{end} 表示电池终止 SOC。

电池充电总能量 $E_{\text{bat_chrg}}$ 如式(9)所示

$$E_{\text{bat_chrg}} = \max \left\{ 0, (\text{SOC}_{\text{end}} - \text{SOC}_{\text{ini}}) \right\} \quad (9)$$

根据上述混合动力系统内部各节点处能量计算, 所划分的传动系统模块的输入总能量包括: 发动机实际提供能量 E_{ice} 、电池端再生制动总回收能量 E_{rgb} 以及电池放电总能量 $E_{\text{bat_dischrg}}$; 传动系统模块的输出总能量包括: 车轮处循环工况理论总驱动能量 E_{wh} 以及电池充电总能量 $E_{\text{bat_chrg}}$ 。结合能量守恒定律, 定义混合动力系统的平均综合传动效率 η_{tr} , 如式(10)所示

$$\eta_{\text{tr}} = \begin{cases} \frac{E_{\text{wh}}}{(E_{\text{ice}} + E_{\text{rgb}} \eta_{\text{bat_chrg}} \eta_{\text{bat_dischrg}} + E_{\text{bat_dischrg}} \eta_{\text{bat_dischrg}})} & \text{SOC}_{\text{end}} < \text{SOC}_{\text{ini}} \\ \frac{E_{\text{wh}}}{E_{\text{ice}} + E_{\text{rgb}} \eta_{\text{bat_chrg}} \eta_{\text{bat_dischrg}}} & \text{SOC}_{\text{end}} = \text{SOC}_{\text{ini}} \\ \frac{E_{\text{wh}} - E_{\text{bat_chrg}} / \eta_{\text{bat_chrg}}}{E_{\text{ice}} + E_{\text{rgb}} \eta_{\text{bat_chrg}} \eta_{\text{bat_dischrg}}} & \text{SOC}_{\text{end}} > \text{SOC}_{\text{ini}} \end{cases} \quad (10)$$

基于平均综合传动效率的定义, 提出混合动力系统理论油耗计算模型, 如式(11)所示

$$f_e = (E_{\text{wh}} + E_{\text{bat_chrg}} / \eta_{\text{tr}} / \eta_{\text{bat_chrg}} - E_{\text{rgb}} \eta_{\text{tr}} \eta_{\text{bat_chrg}} \eta_{\text{bat_dischrg}} - E_{\text{bat_dischrg}} \eta_{\text{tr}} \eta_{\text{bat_dischrg}}) / \eta_{\text{tr}} \cdot b_{e,\text{avg}} \cdot C \quad (11)$$

式中, $\eta_{\text{bat_chrg}}$ 表示电池平均充电效率; $\eta_{\text{bat_dischrg}}$ 表示电池平均放电效率。

1.3 综合油耗增量计算模型

基于上述混合动力系统理论油耗计算模型, 进一步分析混合动力系统油耗影响因素, 并建立综合油耗增量计算模型, 定量计算各影响因素可实现的节油指标。

式(11)中, 车轮处循环工况理论总驱动能量 E_{wh} 取决于循环工况需求, 在循环工况选定的情况下, 该能量为常数; 电池充放电能量 $E_{\text{bat_chrg}}$ 、 $E_{\text{bat_dischrg}}$ 取决于循环工况仿真结束后电池 SOC 的终值, 若工况运行结束 SOC 完全平衡, 则电池充电、放电总能量均为 0, 但实际控制过程中很难实现 SOC 的完全平衡。若终止 SOC 降低, 为补充电池电量损失, 应在理论油耗的基础上加上电池能量消耗对应的油耗; 若终止 SOC 升高, 说明存在部分燃油转化成电池能量储存起来, 没有用于整车驱动, 应在理论油耗的基础上减去这部分油耗。因此, 在上述理论油耗模型的基础上加入电池电量修正, 根据理论计算模型将电池充、放电电量等效计算为百公里油耗, 如式(12)所示

$$f_{e,\text{unify}} = \begin{cases} f_e + E_{\text{bat_dischrg}} \cdot \eta_{\text{bat_dischrg}} \cdot b_{e,\text{avg}} \cdot C & \text{SOC}_{\text{end}} < \text{SOC}_{\text{ini}} \\ f_e & \text{SOC}_{\text{end}} = \text{SOC}_{\text{ini}} \\ f_e - \frac{E_{\text{bat_chrg}} \cdot b_{e,\text{avg}} \cdot C}{\eta_{\text{tr}} \cdot \eta_{\text{tr}} \cdot \eta_{\text{bat_chrg}}} & \text{SOC}_{\text{end}} > \text{SOC}_{\text{ini}} \end{cases} \quad (12)$$

进一步推导, 得到电量修正后的混合动力系统统一理论综合油耗计算模型, 如式(13)所示

$$f_{e_unify} = \frac{E_{wh} \left[1 - \frac{E_{rgb}}{E_{wh}} \eta_{tr} \eta_{bat_chrg} \eta_{bat_dischrg} \right]}{\eta_{tr} \cdot b_{e,avg} \cdot C} \quad (13)$$

式中, f_{e_unify} 表示理论综合百公里油耗, L/100 km。

根据式(13)所示的理论综合油耗计算模型, 进一步分析再生制动能量、发动机平均燃油消耗率、混合动力系统平均综合传动效率对整车百公里油耗的影响。

首先, 定义系统平均综合传动效率的变化梯度 ∇ , 以及发动机平均燃油消耗率的变化梯度 γ , 如式(14)与式(15)所示

$$\begin{cases} \nabla = \Delta\eta / \eta_{tr} \\ \eta_{tr_inc} = \eta_{tr} + \Delta\eta = \eta_{tr} (1 + \nabla) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \gamma = \Delta b_e / b_{e,avg} \\ b_{e,avg_inc} = b_{e,avg} + \Delta b_e = b_{e,avg} (1 + \gamma) \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\Delta\eta$ 表示平均综合传动效率变化量; η_{tr_inc} 表示相对 η_{tr} 变化后的平均综合传动效率; Δb_e 表示发动机平均燃油消耗率变化量, g/(kW · h); b_{e,avg_inc} 表示相对 $b_{e,avg}$ 变化后的发动机平均燃油消耗率, g/(kW · h)。

进一步, 可以推导混合动力系统理论综合油耗增量计算模型, 如式(16)所示

$$\begin{cases} f_{e_unify_inc} = E_{wh} / \eta_{tr} \cdot b_{e,avg} \cdot C \cdot \left[1 - \frac{(1 + \gamma) \left[\nabla + \frac{E_{rgb_inc}}{E_{wh}} \eta_{tr} \eta_{bat} (1 + \nabla) \right]}{1 + \nabla} - \gamma \right] \\ E_{rgb_inc} = E_{rgb} + \Delta E_{rgb} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $f_{e_unify_inc}$ 表示各因素变化后混合动力系统综合百公里油耗, L/100 km; E_{rgb_inc} 表示变化后的再生制动回收能量, kJ; ΔE_{rgb} 表示再生制动回收能量变化量, kJ; η_{bat} 表示电池充放电效率。

1.4 节油量与节油率定义

根据上述混合动力系统理论油耗计算模型以及综合油耗增量模型, 进一步计算混合动力系统节油量理论公式, 如式(17)所示

$$\Delta f_e = f_{e_unify} - f_{e_unify_inc} = E_{wh} / \eta_{tr} \cdot b_{e,avg} \cdot C \cdot \sigma_{fe} \quad (17)$$

式中, Δf_e 表示节油量, L/100 km; σ_{fe} 表示节油率, 其理论计算公式如式(18)所示

$$\sigma_{fe} = \frac{(1 + \gamma) \nabla}{1 + \nabla} + \frac{\Delta E_{rgb} + \gamma \cdot E_{rgb_inc}}{E_{wh}} \eta_{tr} \eta_{bat} - \gamma \quad (18)$$

可见, 式(18)所提出的节油率的物理映射关系为混合动力系统节油能量占车轮处理论总驱动能量的比值。

2 油耗影响因素分析

混合动力系统的基本节能途径包括减小发动机功率、消除发动机怠速、再生制动和优化发动机工作区间。其中, 消除发动机怠速功能已经实现商业化, 在行驶工况相同的条件下, 不同混动系统构型在消除怠速方面节油效果差别不大; 减小发动机功率可以提高其负荷率, 实现节油, 因此在系统构型确定后, 其节能效果是通过优化发动机工作区间实现的。基于此, 文中基于 P1 构型商用车分析再生制动能量回收以及优化发动机工作区间对油耗的影响。

滚动阻力系数、电机效率和机械传动效率的变化都会引起混动系统再生制动能量回收的变化, 从而导致不同的节油效果; 同时, 由于优化发动机工作区间会带来额外的能量损失, 导致分析混动系统节油效果困难, 且优化发动机工作区间的实质是提升发动机效率, 即降低发动机平均燃油消耗量, 故可将发动机模型简化, 分析发动机平均燃油消耗量变化带来的节油效果。

2.1 滚动阻力系数理论节油分析

基于混合动力系统宏观能量角度, 滚动阻力系数减小使车轮处需求总驱动能量减小, 从而减小发动机输出功率; 同时, 滚动阻力系数的减小会使车辆制动时损失掉的滚动阻力功率减小, 在同样制动动能的条件下, 回收更多的能量。根据定义, 综合传动效率为发动机到车轮处传动系统(包括机械传动系统和电机系统)效率, 滚动阻力系数对系统综合传动效率影响较小, 此外, 发动机平均燃油消耗率由发动机外特性和控制策略决定, 其他因素的变化对其影响较小。因此, 可忽略滚动阻力系数对发动机平均燃油消耗率和平均综合传动效率的影响, 令 $\gamma \approx 0$ 、 $\nabla \approx 0$, 进而推导出滚动阻力系数变化可实现的混合动力系统节油率 σ_{fe_r} 与节油量 Δf_{e_r} , 如式(19)所示

$$\begin{cases} \sigma_{fe_r} = \frac{\Delta E_{rgb}}{E_{wh}} \eta_{tr} \eta_{bat} \\ \Delta f_{e_r} = E_{wh} / \eta_{tr} \cdot b_{e,avg} \cdot C \cdot \sigma_{fe_r} \end{cases} \quad (19)$$

由式(19)知, 滚动阻力系数变化通过改变需求总驱动能量和再生制动回收能量带来节油, 即

$\frac{\Delta E_{rgb}}{E_{wh}} \eta_{tr} \eta_{bat}$ ，与系统平均综合传动效率、电池效率以及制动能量回收变化量成正比，若电池充放电效率较高，可以简化 $\eta_{bat} \approx 1$ 。

2.2 电机效率理论节油分析

电机对混合动力系统节油具有非常重要的作用，电机效率的提高使再生制动能量回收增加，从而改变平均综合传动效率，根据上述分析可知电机效率变化对发动机平均燃油消耗率影响较小。

因此，可忽略电机效率对发动机平均燃油消耗率的影响，令 $\gamma \approx 0$ ，进而推导出电机效率变化可实现的混合动力系统节油率 σ_{fe_isg} 与节油量 Δf_{e_isg} ，如式(20)所示

$$\begin{cases} \sigma_{fe_isg} = \frac{\nabla}{1 + \nabla} + \frac{\Delta E_{rgb}}{E_{wh}} \eta_{tr} \eta_{bat} \\ \Delta f_{e_isg} = E_{wh} / \eta_{tr} \cdot b_{e,avg} \cdot C \cdot \sigma_{fe_isg} \end{cases} \quad (20)$$

可见，电机效率的变化通过影响再生制动能量回收和平均综合传动效率实现节油率和节油量的变化，且与系统平均综合传动效率和制动能量回收变化量成正比。

2.3 机械效率理论节油分析

机械效率是影响节油效果的又一因素。汽车的机械效率主要由离合器效率、变速箱效率和主减速器效率等动力传动部件效率决定。机械效率的提高使再生制动能量回收增加，从而改变平均综合传动效率，同样，机械效率变化对发动机平均燃油消耗率影响较小。

因此，可忽略机械效率对发动机平均燃油消耗率的影响，令 $\gamma \approx 0$ ，进而推导出机械效率变化可实现的混合动力系统节油率 σ_{fe_mc} 与节油量 Δf_{e_mc} ，如式(21)所示

$$\begin{cases} \sigma_{fe_mc} = \frac{\nabla}{1 + \nabla} + \frac{\Delta E_{rgb}}{E_{wh}} \eta_{tr} \eta_{bat} \\ \Delta f_{e_mc} = E_{wh} / \eta_{tr} \cdot b_{e,avg} \cdot C \cdot \sigma_{fe_mc} \end{cases} \quad (21)$$

从式(21)可知，机械效率变化可实现的节油率和节油量与系统平均综合传动效率和制动能量回收变化量成正比。

2.4 发动机平均燃油消耗率理论节油分析

当混合动力系统发动机参数确定之后，发动机平均燃油消耗率优化主要通过控制策略优化发动机工作区间实现。控制策略对发动机平均工作效率的影响机理，文中不作重点分析，而是重点研究发动机平均燃油消耗率的变化对油耗的影响。

为了尽可能清晰地表达发动机平均燃油消耗率变化对混合动力系统节油的影响，忽略计算过程中变化不敏感的因素，考虑发动机平均燃油消耗率变化对再生制动和平均综合传动效率影响较小，设 ΔE_{rgb} 、 $\nabla \approx 0$ 。从而推导出发动机平均燃油消耗率变化对混合动力系统节油率 σ_{fe_be} 与节油量 Δf_{e_be} ，如式(22)所示

$$\begin{cases} \sigma_{fe_be} = \gamma \left(\frac{E_{rgb}}{E_{wh}} \eta_{tr} \eta_{bat} - 1 \right) \\ \Delta f_{e_be} = E_{wh} / \eta_{tr} \cdot b_{e,avg} \cdot C \cdot \sigma_{fe_be} \end{cases} \quad (22)$$

可见，发动机平均燃油消耗率变化可实现的节油量和节油率与发动机平均燃油消耗率变化梯度成正比。

3 油耗影响因素验证

基于 P1 构型商用车参数，仿真验证上述各油耗影响因素理论分析的合理性，并根据上述理论分析结果定量计算不同油耗影响因素可实现的节油率及节油量，由于篇幅原因，本文只讨论 CWTVC(世界重型商用车瞬态循环驾驶工况)公路工况的计算结果。本文的仿真节油率是基于 CRUISE 软件得到的，仿真与理论计算采用相同的整车参数与控制方法。

3.1 滚动阻力系数节油分析验证

不同滚动阻力系数下的计算结果如表 2 所示，可知随着滚动阻力系数的降低，再生制动回收能量升高，理论循环总驱动能量降低，仿真计算节油率与理论计算节油率结果相差不大，计算误差均小于 4%，证明文中提出的油耗理论分析模型合理。

表 2 不同滚动阻力系数变化的计算结果

参数	Case0	Case1	Case2	Case3
滚动阻力系数(%)	0.7	0.68	0.66	0.64
油耗(L/100 km)	61.71	61.25	60.72	60.22
SOC 初值/终值(%)	80/80.3	80/80.2	80/80.2	80/80.2
发动机平均燃油消耗率/[g/(kW·h)]	200	200	200	200
平均综合传动效率(%)	79.8	79.7	79.7	79.6
再生制动回收能量/kJ	6 239	6 298	6 356	6 415
理论循环总驱动能量/kJ	465 84	46 237	45 891	45 545
仿真节油率(%)	—	0.67	0.78	0.73
理论节油率(%)	—	0.70	0.71	0.71
误差(%)	—	3.55	2.87	3.08

进一步利用理论综合油耗增量模型，定量分析

P1 构型商用车在不同滚动阻力系数下, 可以实现的节油率与节油量, 如图 3 所示。根据计算结果, 滚动阻力系数每降低 0.02%: P1 构型商用车节油率提升 0.7%, 节油量提升 0.49 L/100 km。

图 3 不同滚动阻力系数下的节油率与节油量

3.2 电机效率节油分析验证

不同电机效率下的计算结果如表 3 所示, 可知在不同电机效率梯度下, 仿真计算节油率与理论计算节油率结果相差不大, 计算误差均小于 2%, 证明油耗理论分析模型正确。

表 3 不同电机效率变化的计算结果

参数	Case0	Case1	Case2	Case3
电机效率(%)	84	86	88	90
油耗/(L/100 km)	61.71	60.95	60.16	59.35
SOC 初值/终值(%)	80/80.3	80/80.2	80/80.3	80/80.3
发动机平均燃油消耗率/[g/(kW·h)]	200	200	200	200
平均综合传动效率(%)	79.82	80.55	81.29	82.09
再生制动回收能量/kJ	—	0.91	0.92	0.98
理论循环总驱动能量/kJ	—	1.11	1.16	1.18
仿真节油率(%)	—	1.12	1.15	1.21
理论节油率(%)	—	1.21	0.42	1.02

进一步结合理论综合油耗增量模型, 定量分析 P1 构型商用车在电机效率变化的情况下, 可实现的节油率与节油量, 如图 4 所示。根据计算结果, 与电机效率的初始值 84%相比, 电机效率每升高 2%: P1 构型商用车节油率提升 1.16%, 节油量提升 0.79 L/100 km。

图 4 不同电机效率下的节油率与节油量

3.3 机械效率节油分析验证

不同系统机械效率下的计算结果如表 4 所示, 可知在不同机械效率下, 仿真计算节油率与理论计算节油率结果相差不大, 计算误差均小于 2%, 证明油耗理论分析模型正确。

表 4 不同机械效率变化的计算结果

参数	Case0	Case1	Case2	Case3
机械效率(%)	86	88	90	92
油耗/(L/100km)	61.71	60.44	59.08	57.79
SOC 初值/终值(%)	80/80.3	80/80.2	80/80.4	80/80.3
发动机平均燃油消耗率/[g/(kW·h)]	200	200	200	200
平均综合传动效率(%)	79.82	81.2	82.71	84.21
再生制动回收能量/kJ	—	1.72	1.87	1.81
理论循环总驱动能量/kJ	—	1.85	1.99	1.92
仿真节油率(%)	—	1.86	2.01	1.96
理论节油率(%)	—	0.65	0.96	1.45

进一步结合理论综合油耗增量模型, 定量分析 P1 构型商用车在机械效率变化的情况下, 可实现的节油率与节油量, 如图 5 所示。可见机械效率每增加 2%: P1 构型商用车平均综合传动效率梯度变化 1.8%左右, 节油率增加 1.94%, 节油量增加 1.31 L/100 km。

图 5 不同机械效率下的节油率和节油量

3.4 发动机平均燃油消耗率节油分析验证

不同发动机平均燃油消耗率下的计算结果如表 5 所示, 可知在不同发动机平均燃油消耗率下, 仿真计算节油率与理论计算节油率结果相差不大, 计算误差均小于 2%, 证明油耗理论分析模型正确。

表 5 不同发动机平均燃油消耗率变化的计算结果

参数	Case0	Case1	Case2
发动机平均有效燃油消耗率/[g/(kW·h)]	200	195	190
油耗/(L/100 km)	61.71	60.16	58.62
SOC 初值/终值(%)	80/80.3	80/80.3	80/80.3
发动机平均燃油消耗率/[g/(kW·h)]	—	6 239	—
平均综合传动效率(%)	—	79.82	—
再生制动回收能量/kJ	—	2.26	2.25
理论循环总驱动能量/kJ	—	2.26	2.31
仿真节油率(%)	—	0	1.2

进一步结合理论综合油耗增量模型, 定量分析 P1 构型商用卡车在发动机平均燃油消耗率变化的情况下, 可实现的节油率与节油量, 如图 6 所示。

图 6 不同发动机平均燃油消耗量下的节油率和节油量

可见发动机平均燃油消耗率每减小 $5\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$: P1 构型商用卡车节油率增加 2.28%, 节油量增加 1.55 L/100 km。

5 结论

(1) 本文以 P1 构型商用卡车的内部能量流为例建立了理论油耗计算模型和综合油耗增量计算模型, 并基于两模型定义了节油量和节油率的理论公式, 以便从根源定量揭示混合动力系统的节油效果。基于混合动力系统的节油途径分析了混合动力商用车的油耗影响因素并推导出其节油量和节油率公式, 定量验证理论油耗分析模型的正确性。结果表明, 所提出的理论油耗计算模型在误差允许范围内可以有效预测商用车的经济性。

(2) 本文基于理论计算模型分别定量计算了各油耗影响因素所带来的节油效果及节油规律。

(3) 本文基于混动车辆各部件内部能量流动推导的理论公式同样适用于其他混合动力系统。该模型的建立简化了混合动力系统油耗计算多因素耦合的复杂问题, 基于所建立的理论油耗计算模型和综合油耗增量计算模型, 可以定量清晰计算混合动力系统各油耗影响因素所带来的节油效果。该方法对商用车油耗研究具有一定的借鉴作用, 为后续混合动力汽车的开发及经济性评价提出一种理论依据。

参 考 文 献

[1] 叶晓. 并联混合动力汽车控制策略研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
YE Xiao. Research on the control strategy of a parallel hybrid electric vehicle [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.

[2] 刘卓然, 陈健, 林凯, 等. 国内外电动汽车发展现状与趋势[J]. 电力建设, 2015, 36(7): 25-32.
LIU Zhuoran, CHEN Jian, LI Kai, et al. Domestic and foreign present situation and tendency of electric vehicles [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(7): 25-32.

[3] WANG Weihua, SONG Ruifang, GUO Mingchen, et al. Analysis on compound-split configuration of power-split hybrid electric vehicle[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 78: 272-288.

[4] 胡均平, 冯东昱, 李科军. 混合动力汽车动力系统优化建模仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(1): 143-147.
HU Junping, FENG Dongyu, LI Kejun. Modeling and simulation of hybrid electric vehicle power system optimization[J]. Computer Simulation, 2017, 34(1): 143-147.

[5] 赵子亮, 郑益红, 刘建康, 等. 混合动力汽车节油因素研究[C]//中国汽车工程学会年会论文集. 上海: 中国汽车工程学会, 2014: 4.
ZHAO Ziliang, ZHENG Yihong, LIU Jiankang, et al. Study on fuel-saving factors for hybrid vehicle [C]// Proceedings of SAE of China. Shanghai, Society of Automotive Engineers of China, 2014: 4.

[6] 王华武, 李庆欣, 李春东. 新能源客车燃油经济性提升分析研究[J]. 汽车科技, 2014(3): 5-10.
WANG Huawu, LI Qingxin, LI Chundong. The improvement of fuel economy analysis on the new energy bus [J]. AUTO SCI-TECH, 2014(3): 5-10.

[7] 易迪华, 张龙聪, 张兆龙, 等. 混合动力环卫车节油贡献率分析与研究[C]// 2016 中国汽车工程学会年会论文集. 上海, 中国汽车工程学会, 2016: 5.
YI Dihua, ZHANG Longcong, ZHANG Zhaolong, et al. Experimental study on hybrid sanitation fuel saving contribution rate [C]//SAECCE, Shanghai, Society of Automotive Engineers of China, 2016: 5.

[8] GRAUERS A, UPENDRA K. Energy based method to analyse fuel saving potential of hybrid vehicles for different driving cycles[J]. Ifac Papersonline, 2016, 49(11): 641-648.

[9] DORRI M, SHAMEKHI A H. Design and optimization of a new control strategy in a parallel hybrid electric vehicle in order to improve fuel economy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2011, 225(6): 747-759.

[10] AL-SAMARI A. Study of emissions and fuel economy for parallel hybrid versus conventional vehicles on real world and standard driving cycles[J]. Alexandria Engineering Journal, 2017, 56(4): 721-726.

[11] BIGAZZI AY, CLIFTON KJ. Modeling the effects of congestion on fuel economy for advanced power train

- vehicles[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2015, 38(2): 149-161.
- [12] 曾育平, 秦大同, 苏岭, 等. 计及驾驶室供暖功率需求的插电式混合动力汽车实时控制策略[J]. *汽车工程*, 2016(38): 109-115.
- ZENG Yuping, QIN Datong, SU Ling, et al. The real-time control strategy for plug-in hybrid electric vehicles with consideration of cabin's heating power demand[J]. *Automotive Engineering*, 2016(38): 109-115.
- [13] 陈雪平, 张海亮, 钟再敏, 等. 插电式混合动力汽车能耗及其影响因素分析[J]. *同济大学学报*, 2016, 44(11): 1749-1754.
- CHEN Xueping, ZHANG Hailiang, ZHONG Zaimin, et al. Simulation and user factors analysis of energy consumption of plug-in hybrid electric vehicles [J]. *Journal of Tongji University*, 2016, 44(11): 1749-1754.
- [14] 夏超英, 杜智明. 丰田 PRIUS 混合动力汽车能量优化管理策略仿真分析[J]. *吉林大学学报*, 2017, 47(2): 373-383.
- XIA Chaoying, DU Zhiming. Simulation analysis on energy optimization strategy for Toyota PRIUS hybrid electric vehicle[J]. *Journal of Jilin University*, 2017, 47(2): 373-383.
- [15] 曾小华, 杨南南, 宋大风, 等. 基于功率损失模型的混合动力系统能耗分析[J]. *汽车工程*, 2017, 39(6): 630-635.
- ZENG Xiaohua, YANG Nannan, SONG Dafeng, et al. HEV energy consumption analysis based on power loss model[J]. *Automotive Engineering*, 2017, 39(6): 630-635.
-
- 作者简介: 曾小华, 男, 1977 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为节能与新能源技术。
E-mail: zeng.xiaohua@126.com
- 宋大风(通信作者), 女, 1977 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为车辆底盘电控及液控技术, 包括电控悬架、制动/驱动控制子系统等方面的研究工作。
E-mail: songdf@126.com