

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.02.002

新型双模功率分流机构参数优化及性能分析

杨磊, 胡明辉

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 功率分流式混合动力汽车同时具备串联式和并联式混合动力汽车的优点, 但单模功率分流混合动力汽车会产生较高的电损耗。提出一种双模功率分流机构以改善单模功率分流机构的电耗高的缺点, 不同于传统多行星齿轮组和多离合器的双模功率分流机构, 仅包含单行星齿轮组, 利用同步器进行模式切换。使用基于全局优化能量管理策略的后向仿真方法, 以燃油经济性为目标, 对该功率分流机构和丰田混合动力系统 (THS) 进行动力传动系统参数优化, 并对仿真结果进行能量流分析。结果表明, 相较丰田混合动力系统, 提出的功率分流机构能降低电损失。

关键词: 混合动力汽车; 动力传动系统; 燃油经济性; 参数优化

中图分类号: U27

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)02-012-09

Parameter optimization and performance analysis of a new power split powertrain

YANG Lei, HU Minghui

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: This paper proposed a new power-split hybrid electrical powertrain to reduce electric loss of single-mode power split hybrid electric vehicle (PSHEV). Different from traditional dual-mode power split mechanism with multi-planetary gear set and multi-clutch, this powertrain is a dual-mode configuration with a single planetary gear set, realizing mode switching by a Synchronizer. The backward simulation method based on global optimization energy management strategy was used to optimize the parameters of the proposed powertrain and Toyota Hybrid System (THS). The optimization results analyzed by energy flow method show that the proposed power split powertrain can reduce the power loss compared with that of THS.

Keywords: hybrid electric vehicle; powertrain; fuel economy; parameter optimization

插电式混合动力汽车作为传统燃油汽车向新能源汽车转变的过度, 兼具两者的优点^[1-4]。以搭载丰田混合动力系统 (THS) 的车型为代表的功率分流式混合动力汽车 (PSHEV) 表现出了较好的节油能力^[5]。相比于并联式 HEV, 它通过行星齿轮机构使发动机与两个电机输出的功率进行耦合, 能够将发动机与电机完全

收稿日期: 2019-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51675062)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51675062).

作者简介: 杨磊 (1994—), 男, 重庆大学硕士研究生, 主要从事混合动力汽车动力传动系统方面的研究, (E-mail) 20163202012@cqu.edu.cn.

通讯作者: 胡明辉, 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail) minghui_h@163.com.

解耦。且由于部分功率经过机械路径传递,其传递效率高于串联式 HEV^[6]。

PSHEV 主要分为输入分流型、输出分流型和复合分流型^[7-8]。它们分别适合于一定的行驶工况,但超出适用范围时,部分能量在耦合机构中产生循环,导致电耗增加^[9]。比如,典型输入分流型 THS,其整车在高速行驶时,电耗增加,燃油经济性恶化。目前,解决上述问题的方法是将两种分流类型相结合,消除 PSHEV 行驶中的能量循环现象。因为输入分流型适用于低速工况,输出分流型和复合分流型适用于高速工况,所以通常将输入分流型与后两者进行组合。

动力传动系统性能分析方面,采用后向仿真方法能够定量地得出动力传动系统对整车燃油经济性的影响^[10-12]。在整车相应部件建模完成的基础上,设计合适的能量管理策略,最后以仿真油耗作为动力传动系统的评价指标。此外,利用该方法对动力传动系参数优化,能进一步评价动力传动系的节油潜力^[13-14]。

综上所述,目前典型单模功率分流机构有电耗较高的缺点。通过多个功率分流模式的组合能降低电耗,但需要多个行星齿轮组和离合器,增加机构的复杂度。

为此,笔者提出一种将输入分流式与输出分流式结合的功率分流机构,它仅包含单个行星排,利用一个同步器代替多个离合器进行模式切换。采用基于全局优化能量管理策略的后向仿真方法,分别对该结构及 THS 功率分流机构进行燃油经济性仿真和参数优化,并将优化结果进行对比,验证该结构相比于 THS 提升了整车的燃油经济性。

1 耦合机构及功率流分析

1.1 结构描述

图 1(a)为提出的功率分流机构简图,齿圈作为发动机的输入轴,电机 1 与太阳轮固定连接,电机 2 随同步器位置的改变与不同的行星齿轮元件连接。当同步器与减速齿轮 1 接合时,为输入分流模式,电机 2 功率经过减速齿轮 1 直接流向输出轴;当同步器与减速齿轮 2 接合时,为输出分流模式,电机 2 功率经过减速齿轮 2 输入齿圈,再通过行星架流向输出轴。

THS 功率分流机构如图 1(b)所示,发动机与行星架固定连接,电机 1 与太阳轮固定连接。电机 2 通过减速齿轮向功率分流机构输出轴输出功率。THS 功率分流机仅能实现输入分流模式。

两种动力传动系统的模式如表 1,2 所示。

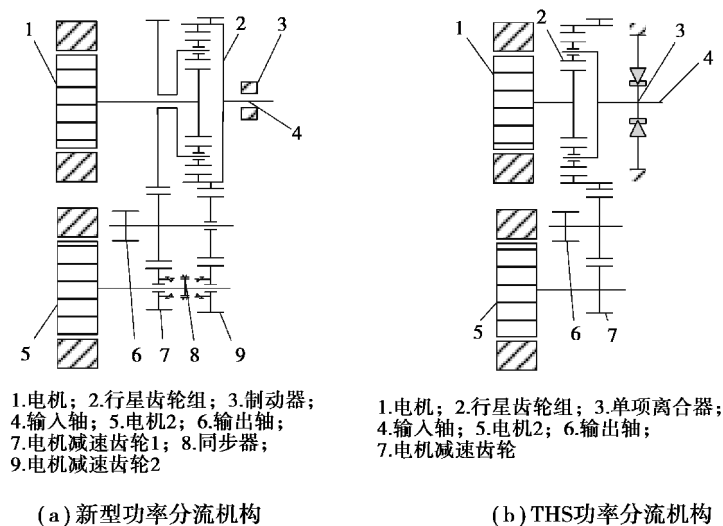


图 1 功率分流机构布置简图

Fig. 1 Layout schematics of power-split mechanism

表 1 THS 的模式

Table 1 Operating modes of THS

代号	模式	发动机状态	电机 1 状态	电机 2 状态	单项离合器状态
1	纯电 1	关闭	关闭	打开	接合
2	纯电 2	关闭	打开	打开	接合
3	输入分流	打开	打开	打开	接合

表 2 新型机构的模式

Table 2 Operating modes of new mechanism

代号	模式	发动机状态	电机 1 状态	电机 2 状态	制动器状态	同步器状态
1	纯电 1	关闭	关闭	打开	接合	接合(与齿轮 1)
2	纯电 2	关闭	打开	打开	接合	接合(与齿轮 1)
3	输入分流	打开	打开	打开	分离	接合(与齿轮 1)
4	输出分流	打开	打开	打开	分离	接合(与齿轮 2)

1.2 运动学和力学关系

对提出的机构进行研究。假设行驶中无电量消耗,根据行星齿轮运动学和力学关系,当功率分流机构工作在输入分流模式时:

$$\begin{cases} K \omega_{\text{out}} + \omega_{\text{MG1}} = (1 + K) \omega_e, \\ \omega_{\text{MG2}} = \omega_{\text{out}} \cdot i_{\text{GP1}}, \\ T_{\text{MG1}} + T_{\text{out}} + i_{\text{GP1}} T_{\text{MG2}} + T_e = 0, \\ T_{\text{MG1}} (1 + K) + T_e K = 0, \\ \omega_{\text{MG1}} T_{\text{MG1}} + \eta_{\text{ele}} \omega_{\text{MG2}} i_{\text{GP1}} T_{\text{MG2}} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_{out} 和 T_{out} 分别为输出轴转速和转矩; ω_{MG1} 和 T_{MG1} 分别为电机 1 转速和转矩; ω_{MG2} 和 T_{MG2} 分别为电机 2 转速和转矩; K 表示行星齿轮特征参数; i_{GP1} 表示减速齿轮 1 的速比,由于其不影响功率流向,为了研究方便暂时取 1; η_{ele} 为电路效率,当功率由电机 1 流向电机 2 时, $\eta_{\text{ele}} < 1$,当功率由电机 2 流向电机 1 时, $\eta_{\text{ele}} > 1$ 。

再定义传动比:

$$\gamma = \frac{\omega_e}{\omega_{\text{out}}}. \quad (2)$$

由式(1)可得各部件与发动机的转速转矩关系,如式(3)所示。

$$\begin{cases} \frac{\omega_{\text{MG1}}}{\omega_e} = \frac{1 + K}{\gamma} - K, \\ \frac{\omega_{\text{MG2}}}{\omega_e} = \frac{1}{\gamma}, \\ \frac{\omega_{\text{out}}}{\omega_e} = \frac{1}{\gamma}, \\ \frac{T_{\text{MG1}}}{T_e} = \frac{1}{K}, \\ \frac{T_{\text{MG2}}}{T_e} = \frac{1}{\eta_{\text{ele}}} \left(\gamma - \frac{1 + K}{K} \right), \\ \frac{T_{\text{out}}}{T_e} = 1 + \frac{1}{K} + \frac{1}{\eta_{\text{ele}}} \left(\gamma - \frac{1 + K}{K} \right). \end{cases} \quad (3)$$

类似地,在输出分流模式下,有方程组:

$$\begin{cases} K \omega_{out} + \omega_{MG1} = (1 + K) \omega_e, \\ \omega_{MG2} = \omega_e \cdot i_{GP2}, \\ T_{MG1} + T_{out} + i_{GP2} T_{MG2} + T_e = 0, \\ T_{MG1} (1 + K) + (T_e + i_{GP2} T_{MG2}) K = 0, \\ \omega_{MG1} T_{MG1} + \eta_{ele} \omega_{MG2} i_{GP2} T_{MG2} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

同样取 $i_{GP2} = 1$,由式(2)和(4)推导,得出此时发动机和各部件的转速转矩关系,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \frac{\omega_{MG1}}{\omega_e} = \frac{1 + K}{\gamma} - K, \\ \frac{\omega_{MG2}}{\omega_e} = 1, \\ \frac{\omega_{out}}{\omega_e} = \frac{1}{\gamma}, \\ \frac{T_{MG1}}{T_e} = \frac{1}{K} \cdot \frac{\eta_{ele} \gamma K}{1 + K - \gamma K (1 + \eta_{ele})}, \\ \frac{T_{MG2}}{T_e} = \frac{\gamma K - 1 - K}{1 + K - \gamma K (1 + \eta_{ele})} \\ \frac{T_{out}}{T_e} = \frac{1 + K}{K} \left(\frac{\eta_{ele} \gamma K}{1 + K - \gamma K (1 + \eta_{ele})} \right) \end{cases} \quad (5)$$

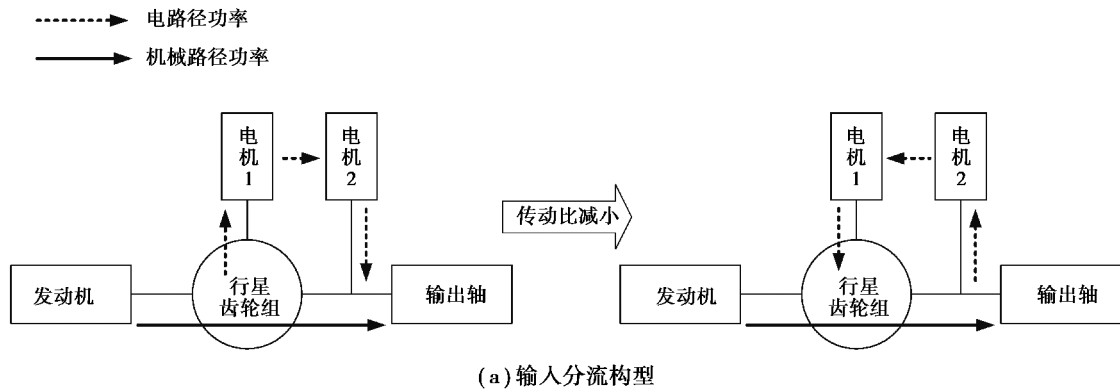
1.3 功率流分析

由式(3)可知,输入分流模式下,当 $\gamma > \frac{1+K}{K}$ 时,电机 1 发电,电机 2 驱动,此时功率由电机 1 流向电机 2,发动机输出功率经过耦合机构分流; $\gamma < \frac{1+K}{K}$ 时,电机 1 驱动,电机 2 发电,发动机部分输出功率在耦合机构中循环。

由式(5)可知,输出分流模式下,当 $\gamma > \frac{1+K}{K}$ 时,电机 1 发电,电机 2 驱动,产生功率循环现象;当 $\gamma < \frac{1+K}{K}$ 时,电机 1 驱动,电机 2 发电,输出功率在耦合机构中分流。

两种模式下的功率流变化如图 2 所示。通过将两种模式组合,能够避免功率循环现象。

THS 功率耦合机构仅具有输入分流模式,在小传动比(高速行驶)时出现功率循环现象,导致电路径损失增加。



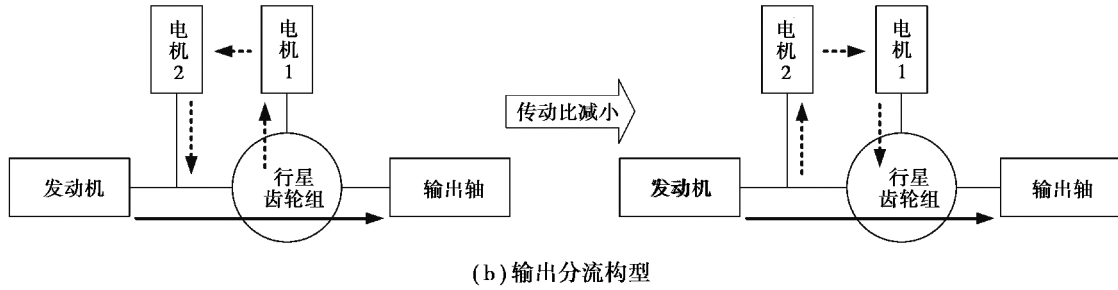


图 2 功率分流示意图

Fig. 2 Power flows of input-and output-split powertrains

2 基于后向仿真的参数优化

根据定工况下车轮处的需求转速矩和转速逆向推导出传动系统各部件的转速转矩,再得出整车性能指标,称为后向仿真^[15]。它主要用于整车设计阶段的方案对比和参数优化。以燃油经济性为目标,采用后向仿真方法优化新型功率分流机构及 *THS* 功率分流机构的参数,并在优化完成后,进行燃油经济性对比。

选定的整车及动力源参数如表 3 所示。发动机、电机及电池模型为通过实验测试的稳态数据的插值模型。能量管理策略采用基于 *DP* 算法的全局优化能量管理策略,以保证控制效果最优^[16-17]。

表 3 整车及关键部件参数

Table 3 Parameters of vehicle and components

部件	参数	取值
整车	仿真质量 m/kg	1 600
	迎风面积 A/m^2	2.537
	风阻系数 C_d	0.349
	滚阻系数 C_r	0.008
	轴距 L/m	2.570
	质心到前轴距离 a/m	1.309
	车轮半径 r_w/m	0.337
	车轮惯量 $J_w/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.6
发动机	地面附着系数 μ	0.8
	发动机惯量 $J_e/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.17
	最高转速 $\omega_{e,\max}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	6 000
	峰值扭矩 $T_{e,\max}(1\ 500\ \text{r}/\text{min})/(\text{N} \cdot \text{m})$	220
	峰值功率 $P_{e,\max}(5\ 500\ \text{r}/\text{min})/\text{kW}$	110

续表 3

部件	参数	取值
电机 1	电机 1 惯量 $J_{MG1}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.013
	最高转速 $\omega_{MG1,\max}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	12 000
	峰值扭矩 $(T_{MG1,\max})(0 \sim 2\,250 \text{ r/min})/(\text{N} \cdot \text{m})$	170
	峰值功率 $(P_{MG1,\max})(2\,250 \text{ r/min})/\text{kW}$	40
电机 2	电机 2 惯量 $J_{MG2}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.015 3
	最高转速 $\omega_{MG2,\max}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	12 000
	峰值扭矩 $T_{MG2,\max}(0 \sim 3\,000 \text{ r/min})/(\text{N} \cdot \text{m})$	207
	峰值功率 $P_{MG2,\max}(3\,000 \text{ r/min})/\text{kW}$	60
电池	电池电量 $Q_c/(\text{A} \cdot \text{h})$	6.5
	开路电压 V_{OC}/V	340
	充电内阻 R_{char}/Ω	0.17
	放电内阻 R_{char}/Ω	0.15

2.1 参数优化

新型机构的优化参数为行星齿轮特征参数 K 、主减速器速比 i_0 、电机减速齿轮 1 速比 i_{GP1} 和电机减速齿轮 2 速比 i_{GP2} ；THS 功率分流机构的优化参数为行星齿轮特征参数 K 、主减速器速比 i_0 、电机减速齿轮 1 速比 i_{GP} 。考虑到实际布置的限制,对各优化参数范围进行规定,如表 4 所示。

表 4 优化参数范围

Table 4 Ranges of optimized parameters

耦合机构	取值范围
新型机构	$K\ 2.5 \sim 4.0; i_0\ 2.5 \sim 4.0; i_{GP1}\ 2.0 \sim 3.0; i_{GP2}\ 1.5 \sim 2.5$
THS	$K\ 2.5 \sim 4.0; i_0\ 2.5 \sim 4.0; i_{GP}\ 2.0 \sim 3.0$

以 WLTC 作为典型工况^[18],优化参数间隔为 0.1,所得优化结果如表 5 所示,新型机构相比 THS 仿真油耗降低。

表 5 参数优化结果

Table 5 Results of optimized parameters

耦合机构	最优参数	仿真油耗/ $(\text{L} \cdot (100 \text{ km})^{-1})$
新型机构	$K = 4; i_0 = 2.5; i_{GP1} = 2.0; i_{GP2} = 1.5$	5.19
THS	$K = 3.5; i_0 = 3.6; i_{GP} = 2.0$	5.23

2.2 对比分析

两种功率分流机构在最优参数下的仿真过程如图 3 所示。低车速时,两种机构都选择选择相同的模式;高车速时,新机构运行于输出分流模式,THS 功率分流机构运行仍保持输入分流模式。这说明输出分流模式能在高速时具有更优的整车效率。

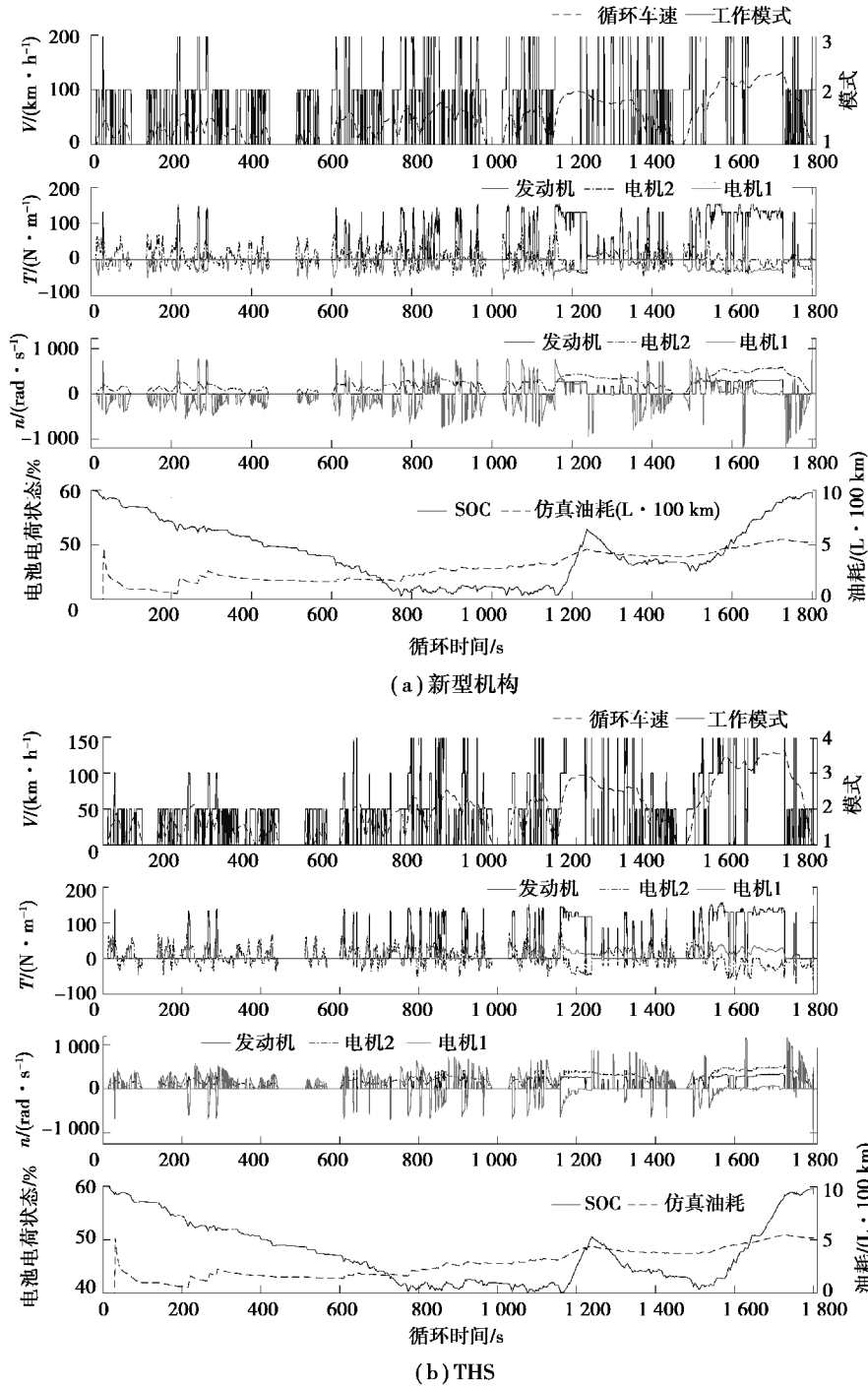


图 3 油耗仿真过程

Fig. 3 Process of fuel consumption simulation

为进一步分析仿真中的油耗差异,对两次仿真进行能量流分析。如图 4 所示,两种机构的仿真中,新型耦合机构比 THS 功率分流机构的电路径效率高,因此,新型耦合机构的整车动力传动系统的效率更高。造成上述效率差异的原因是,新型机构增加的输出分流模式,改善了整车在高速行驶的传动效率。

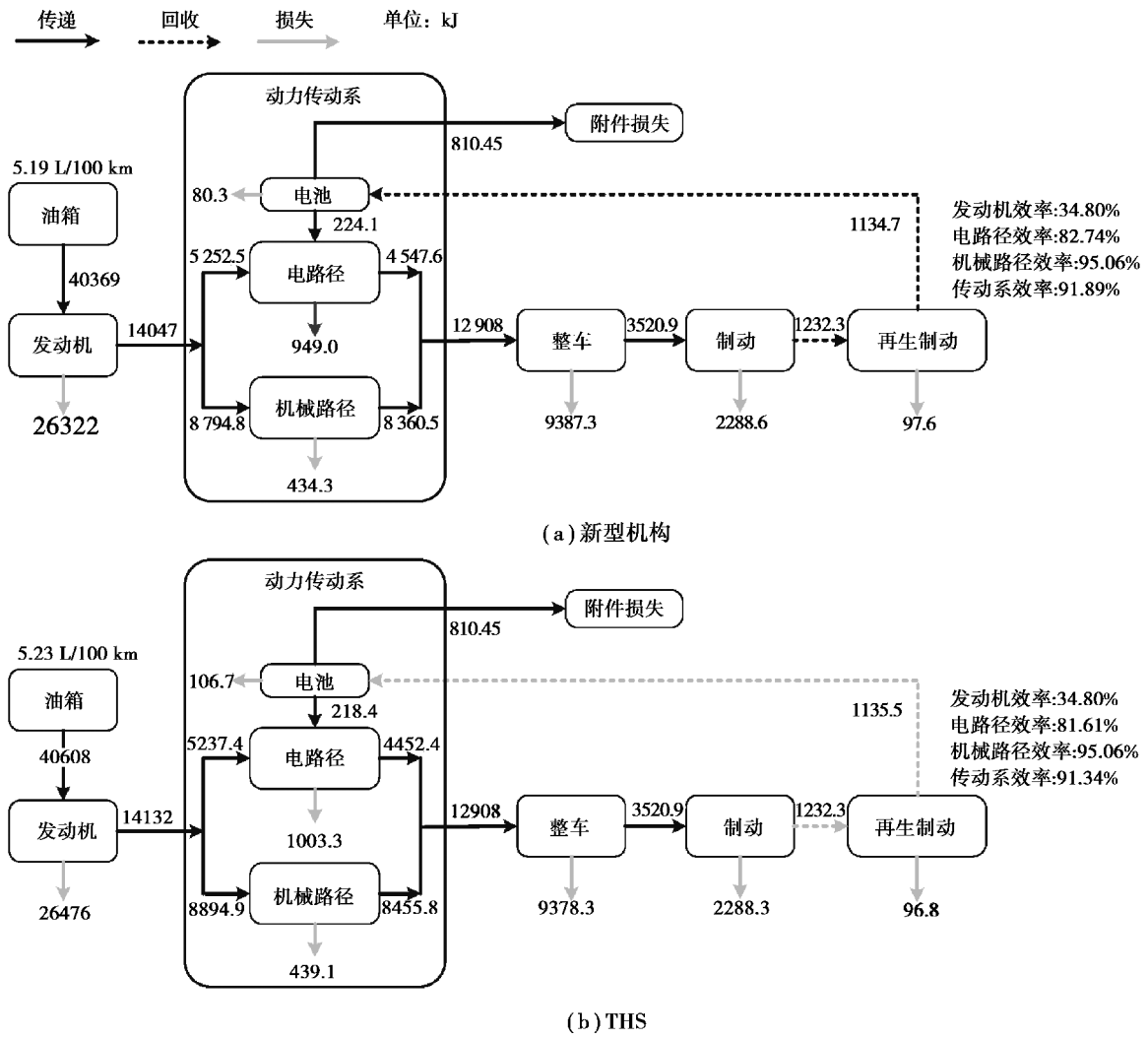


图 4 能量流分析

Fig. 4 Analysis of energy flow

3 结 论

为降低传统功率分流混合动力汽车的电耗,提出一种新型双模功率分流机构。通过动力传动运动学和力学推导及功率流分析,证明该功率分流机构能够避免功率循环,提高了传动效率。建立整车后向仿真模型,对提出的功率分流机构和典型单模功率分流机构 THS 进行参数优化,并对优化后的两种动力传动系统的仿真过程和能量流进行对比分析。结果表明,相比于 THS 功率分流机构,提出的新型机构通过减小电路径损失,提升了整车的燃油经济性。

后续研究将以搭载新型功率分流机构的混合动力汽车为对象,设计实车控制策略,利用前向仿真进一步分析该新型功率分流机构对整车性能的影响。

参考文献:

[1] Sreedhar V. Plug-in hybrid electric vehicles with full performance[C/OL]. 2006 IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles. New York, USA: IEEE. (2007-04-23) [2018-09-25].<https://ieeexplore.ieee.org/document/4156566>

[2] Emadi A, Rajashekar K, Williamson S S, et al. Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 763-770.

[3] Onat N C, Kucukvar M, Tatari O. Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative

- carbon and energy footprint analysis in the United States[J]. *Applied Energy*, 2015, 150: 36-49.
- [4] 舒红, 秦大同, 胡建军. 混合动力汽车控制策略研究现状及发展趋势[J]. *重庆大学学报*, 2001, 24(6): 28-31.
SHU Hong, QIN Datong, HU Jianjun. Research on current situation and trend of control strategies for hybrid electric vehicles[J]. *Journal of Chongqing University*, 2001, 24(6): 28-31. (in Chinese)
- [5] Wang C, Zhao Z G, Zhang T, et al. Development of a compact compound power-split hybrid transmission based on altered ravigneaux gear set[C/OL]. SAE Technical Paper Series. Warrendale, PA, United States: SAE International, 2014(2014-04-01)[2018-09-25]. <https://saemobilus.sae.org/content/2014-01-1793/>.
- [6] 项昌乐, 韩立金, 刘辉, 等. 混联混合动力车辆功率分流耦合机构特性分析[J]. *汽车工程*, 2010, 32(3): 183-187.
XIANG Changle, HAN Lijin, LIU Hui, et al. An analysis on the characteristics of power-split and coupling mechanism in series/parallel HEV[J]. *Automotive Engineering*, 2010, 32(3): 183-187. (in Chinese)
- [7] Yang H, Kim B, Park Y, et al. Analysis of planetary gear hybrid powertrain system part 2: output split system[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2009, 10(3): 381-390.
- [8] Wang W H, Song R F, Guo M C, et al. Analysis on compound-split configuration of power-split hybrid electric vehicle[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 78: 272-288.
- [9] 王伟华, 宋瑞芳, 刘松山, 等. 双模功率分流式混合动力系统构型分析[J]. *汽车工程*, 2015, 37(6): 648-654, 724.
WANG Weihua, SONG Ruifang, LIU Songshan, et al. An analysis on the configuration of dual-mode power-split hybrid powertrain system[J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(6): 648-654, 724. (in Chinese)
- [10] Kim H, Kang J, Kum D. Impact of speed reduction (multiplication) gear on the performance of input- and output-split hybrid electric vehicles[C/OL]. SAE Technical Paper Series. Warrendale, PA, United States: SAE International. (2017-05-28)[2018-09-25]. <https://saemobilus.sae.org/content/2017-01-1147/>.
- [11] Kim H, Kum D. Comprehensive design methodology of input- and output-split hybrid electric vehicles; in search of optimal configuration[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(6): 2912-2923.
- [12] Barhoumi T, Kim H, Kum D. Compound lever based optimal configuration selection of compound-split hybrid vehicles[C/OL]. SAE Technical Paper Series. Warrendale, PA, United States: SAE International. (2017-05-28) [2018-09-25]. <https://saemobilus.sae.org/content/2017-01-1148/>.
- [13] Zhou X Y, Qin D T, Hu J J. Multi-objective optimization design and performance evaluation for plug-in hybrid electric vehicle powertrains[J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 1608-1625.
- [14] 苏岭, 曾育平, 秦大同. 插电式混合动力汽车能量管理策略研究现状和发展趋势[J]. *重庆大学学报*, 2017, 40(2): 10-15.
SU Ling, ZENG Yuping, QIN Datong. Current situation and development trend of plug-in hybrid electric vehicle's energy management strategies[J]. *Journal of Chongqing University*, 2017, 40(2): 10-15. (in Chinese)
- [15] Enang W, Bannister C. Modelling and control of hybrid electric vehicles (A comprehensive review)[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 74: 1210-1239.
- [16] 邹渊, 侯仕杰, 韩尔樑, 等. 基于动态规划的混合动力商用车能量管理策略优化[J]. *汽车工程*, 2012, 34(8): 663-668.
ZOU Yuan, HOU Shijie, HAN Erliang, et al. Dynamic programming-based energy management strategy optimization for hybrid electric commercial vehicle[J]. *Automotive Engineering*, 2012, 34(8): 663-668. (in Chinese)
- [17] Vinot E, Trigui R, Cheng Y, et al. Improvement of an EVT-based HEV using dynamic programming[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(1): 40-50.
- [18] Tutuianu M, Bonnel P, Ciuffo B, et al. Development of the World-wide harmonized Light duty Test Cycle (WLTC) and a possible pathway for its introduction in the European legislation[J]. *Transportation Research Part D*, 2015, 40: 61-75.