

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.01.017

双模式机电复合传动系统电功率协调控制策略

项昌乐^{1,2}, 吴 洋¹, 王伟达^{1,2}, 刘 辉^{1,2}, 马文杰³(1.北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081;2. 车辆传动国家重点实验室(北京理工大学),北京 100081;
3.内蒙古第一机械集团有限公司科研所, 内蒙古 包头,140032)

摘 要:为提高重型车辆用功率分流式混合动力系统机电功率流调控精度,解决外界用电需求的动态控制问题,提出电功率协调控制策略.该策略利用电机快速响应和精确控制的特点,通过对发电机和电动机的闭环协调控制,调整二者的工作状态,保证动力源功率分配的精确性以及对外供电的稳定性.仿真结果表明,提出的协调控制策略能够使电池实际功率时刻跟随其目标值,并且在外界有用电需求时,确保系统快速调整出相应的电功率以供使用,较好地解决了机电复合传动系统机电功率分配的精确性问题以及对外供电功率响应的复杂动态控制问题.

关键词:双模式机电复合传动;电功率协调控制;能量管理优化;功率精确分配;稳定供电

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

文章编号:0367-6234(2017)01-0120-06

Electric power coordinated control strategy of dual-mode electro-mechanical transmission system

XIANG Changle^{1,2}, WU Yang¹, WANG Weida^{1,2}, LIU Hui^{1,2}, MA Wenjie³

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. National Key Lab. of Vehicular Transmission(Beijing Institute of Technology), Beijing 100081, China;

3. Research Institute, Inner Mongolia First Machinery Group Co.Ltd., Baotou 140032, Inner Mongolia, China)

Abstract: The dual-mode electro-mechanical transmission system for heavy duty vehicles is a power split hybrid system, which transmits engine power through mechanical and electrical power flow. Aiming at the precision of mechanical and electrical power distribution and the responding speed of electrical power supply, the electric power coordinated control strategy is proposed. Making use of quick response and accuracy control of motors, the strategy can realize the precise power distribution of engine and battery and supply steady electric power by coordinating the working state of generator and motor. The simulation results indicate that the actual power of battery will follow its target value in real time and the electric power will be supplied rapidly when it is needed. The electric power coordinated control strategy can achieve the precise distribution of mechanical and electrical power and the high responding speed of electrical power supply in complex dynamic control system.

Keywords: dual-mode electro-mechanical transmission; electric power coordinated control; energy management optimization; precise power distribution; steady electric power supply

双模式机电复合传动系统是混联式混合动力汽车的一种重要形式.它通过切换动力耦合机构的工作模式,在输入转速不变的情况下,改变两个电机的转速状态,使得输出转速连续不断的进行变化,实现无级变速.双模式机电复合传动系统具有调速范围宽,驱动功率大的优点,同时还能满足辅助系统和特定功能系统的用电需求,并且降低了对车用电机的功率要求,因此具有良好的应用前景^[1-2].

对于采用双模式机电复合传动系统的重型车辆,工况往往与民用车辆不同,存在许多特殊问题.

首先,当能量管理策略对功率进行分配之后,各动力源能否精确地按照分配好的功率轨迹进行变化,对于整车的运行起着至关重要的作用.除此之外,重型车辆在运行过程中,往往对电功率有着较大需求,如何快速地向系统协调出相应的电能,也是一个值得关注的问题.虽然目前很多学者都提出了相关的能量管理策略^[3-4],但是对其功率实际分配的精确性以及从一个稳定状态到另外一个稳定状态的动态调节过程,却少有文献提及.在飞行器领域,则有相关学者通过对控制分配技术的研究,提高了控制分配的精确性,从而提升了系统的整体性能^[5-6],但由于对象的本质区别,使其应用在车辆上的难度较大.同时,一般轻型车辆对电功率的需求较少,故部件间的协调控制研究大部分都集中于如何减小换段过程

收稿日期:2016-01-29

基金项目:国家自然科学基金(51005017,51575043,U1564210);

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0048)

作者简介:项昌乐(1963—),男,教授,博士生导师

通信作者:王伟达,wangwd0430@163.com

中的转矩波动^[7-13],鲜有对协调供电的研究.

针对采用双模式机电复合传动系统的重型车辆,本文提出了电功率协调控制策略. 利用电机响应速度快和控制精度好的特点,通过 PID 控制算法,协调电机 A 和电机 B 的工作状态,使得各动力源按照预先分配好的稳态功率精确变化,保证电池稳定工作. 同时当外界需要电功率输出时,系统能够快速协调出外界所需要的电能,从而达到对外供电的稳定性,提升供电品质.

1 系统介绍

图 1 是双模式机电复合传动系统结构简图.

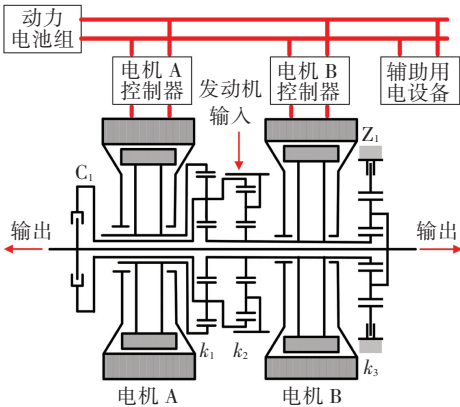


图 1 双模式机电复合传动系统结构简图

Fig.1 Structure of dual-mode electro-mechanical transmission system

由图 1 可看出,发动机输出的动力,经过前传动,由 k_2 排输入至耦合机构. 当离合器 C_1 分离,制动器 Z_1 结合时,发动机一部分功率直接输出至车轮,驱动车辆行驶,另一部分则驱动电机 A 发电,为电机 B 和用电设备提供电功率,此时系统工作在 EVT1 模式;当制动器 Z_1 分离,离合器 C_1 结合时,电机 A 与电机 B 的发电/电动工作状态互换,发动机的一部分功率仍然通过机械结构直接驱动车辆,而另一部分功率则驱动电机 B 发电,电机 A 处于电动状态,此时系统工作在 EVT2 模式.

参考机电复合传动系统结构简图,根据行星排的转速转矩关系式,可得电机 A 和电机 B 的转速、转矩与输入输出转速、转矩之间的关系.

EVT1:

$$\begin{bmatrix} n_a \\ n_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1+k_1)(1+k_2)}{k_1k_2} & -\frac{(1+k_1+k_2)(1+k_3)}{k_1k_2} \\ 0 & 1+k_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_i \\ n_o \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} T_a \\ T_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k_1k_2}{(1+k_1)(1+k_2)} & 0 \\ -\frac{1+k_1+k_2}{(1+k_1)(1+k_2)} & \frac{1}{1+k_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix}.$$

EVT2:

$$\begin{bmatrix} n_a \\ n_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1+k_2}{k_1} & \frac{1+k_1+k_2}{k_1} \\ 1+k_2 & -k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_i \\ n_o \end{bmatrix},$$
$$\begin{bmatrix} T_a \\ T_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k_1k_2}{(1+k_1)(1+k_2)} & \frac{k_1}{1+k_1} \\ -\frac{1+k_1+k_2}{(1+k_1)(1+k_2)} & \frac{1}{1+k_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix}.$$

式中: n_a 、 T_a 分别为电机 A 的转速和转矩, n_b 、 T_b 分别为电机 B 的转速和转矩, n_i 、 T_i 分别为输入的转速和转矩, n_o 、 T_o 分别为输出的转速和转矩.

2 控制策略

2.1 整车稳态目标功率分配控制策略

为了实现行驶安全,实现输出力矩的平稳和行驶过程的平顺,考虑到发动机的最佳燃油经济性,本文采用了基于规则的逻辑门限控制策略^[14-16]. 在该策略中,对车辆的行驶模式进行了分类,并制定了相应的模式切换规则. 在特定的行驶模式下,首先根据整车驱动要求和辅助用电设备的用电需求,确定总需求功率. 然后,根据电池荷电状态(SOC)、车辆行驶工况以及外界的电功率需求,考虑电池的供电能力,确定电池稳态目标功率;总需求功率与电池稳态目标功率之差,即为发动机稳态目标功率. 在此说明,大部分工况下,驱动功率和用电功率均由发动机提供,电池只在大油门驱动等特殊工况下使用. 然后,根据动力耦合机构转速转矩关系,确定各部件的动态控制目标,发动机为转速控制,电机为转矩控制. 最后,将控制目标值通过 CAN 总线,发送至各部件的控制器,控制部件工作. 整车稳态目标功率分配控制策略见图 2.

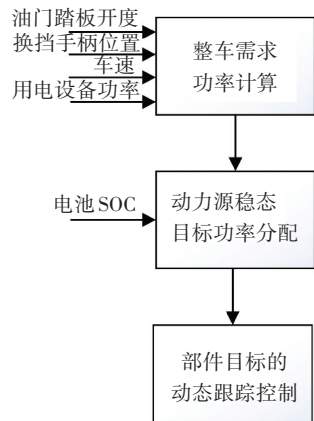


图 2 整车稳态目标功率分配控制策略

Fig.2 Steady-state target power allocation control strategy block diagram

2.2 电功率协调控制策略

通过整车稳态目标功率分配控制策略,确定了发动机和电池两个动力源的稳态目标功率.但由于效率模型的不准确,以及发动机和电机动态响应特性的多重耦合作用,使得发动机和电池的实际功率不能按照分配好的稳态目标进行精确变化.此外,在重型车辆运行过程中,某些工况下,需要系统对外提供较大的电功率,而整车稳态目标功率分配控制策略不能解决动态过程的快速调控问题.本文提出电功率协调控制策略,其主要包括两部分:电池功率闭环反馈控制策略,以及电机协调供电控制策略.

2.2.1 电池功率闭环反馈控制策略

在系统工作过程中,电池处于被动工作的状态,

必须通过对发电机功率和电动机功率的协调控制,实现对电池功率的控制与管理.而考虑到系统的复杂性,效率模型往往不够准确,使得动力源的实际功率无法按照其稳态目标功率进行精确变化.同时,由于发动机的响应速度较慢,当工况产生变化时,功率无法快速进行变化.此时,功率不足的部分就需要电池去提供.这导致在动态过程中,电池功率始终偏离其之前的预定轨迹,无法跟随稳态目标值进行变化.因此,提出电池功率闭环反馈控制策略.利用电机控制精度高和响应速度快的特点,通过对电机 A 和电机 B 的转矩进行动态补偿,弥补发动机在动态特性上的不足,以达到机电功率分配的精确调控和平稳控制.电池功率闭环反馈控制策略如图 3 所示.

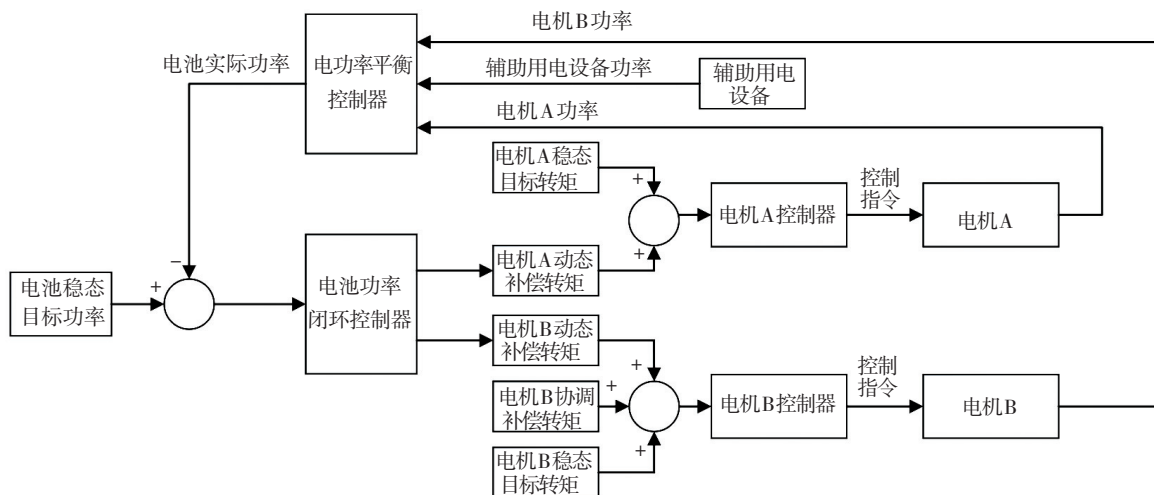


图 3 电池功率闭环反馈控制策略

Fig.3 Block diagram of battery power closed-loop feedback control strategy

该控制策略是基于电池功率进行的.在整个过程中,以电池稳态目标功率为目标值,实际功率由电池管理模块给出的电池工作电压和电流得到,根据电池实际功率与目标功率的偏差,确定电机 A 和电机 B 的动态补偿转矩.由电池的充放电情况,调整电机 A 和电机 B 的工作状态,以确保电池功率能够按照预期所分配的稳态目标功率进行变化,避免电池的过充过放,确保其动力性能和使用寿命.在电池功率闭环反馈控制策略中,闭环控制部分采用工业界常使用的 PID 控制算法进行调节与控制,根据控制对象的特性进行 PID 参数的整定,保证电池功率时刻跟随目标值,不偏离其控制轨迹,达到功率的精确分配.

2.2.2 电机协调供电控制策略

在外界有用电需求时,为保证电池组电量稳定,一般情况下通过协调发电机和电动机的电功率差来实现对外供电,从而保证对外供电的主要来源为发

动机的发电功率.

在 2.2.1 电池功率闭环反馈控制策略中提到,因为发动机的响应较慢,以及效率模型的不准确,所以当外界有用电需求时,往往需要电池多放电,以弥补功率不足的部分.而为了使电池按照预先分配好的稳态功率进行变化,就需要增大发动机功率,发电机增加发电,电动机减少用电,从而实现驱动功率和供电功率的平衡与稳定.在这个过程中,如果转矩分配结果稍有偏差,功率耦合机构各构件的平衡关系就会被打破,电机 A 和电机 B 的转速都会产生波动,进而影响到输出转速 n_o 和转矩 T_o ,从而导致发动机的输出功率不稳定,不能够保证对外的平稳供电.

因此,电池功率闭环反馈控制策略,只能保证机电功率的精确分配,却无法让系统快速协调出外界所需求的电功率.故本文提出电机协调供电控制策略,如图 4 所示,在保证车辆动力性的同时,使系统能够快速输出满足用电需求的电功率,达到稳定供电.

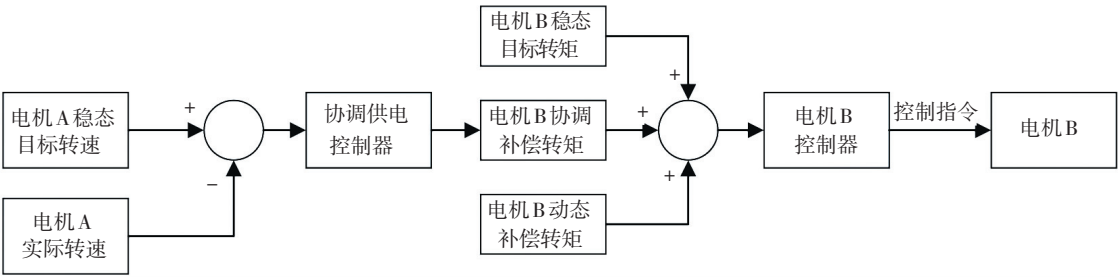


图 4 电机协调供电策略

Fig.4 Block diagram of motor coordinated power supply control strategy

电机协调供电控制策略的基本控制原理为:根据当前工作模式下的转速关系式,确定达到最终稳态运行时电机 A 的稳态目标转速. 将电机 A 的实际转速与目标转速的偏差作为输入值,通过协调供电控制算法,得到电机 B 的协调补偿转矩. 协调供电控制部分,通过 PID 算法实现. 通过对电机 B 的转矩进行协调补偿控制,能够使电机 B 产生符合稳态耦合关系的转速. 当电机 A 和电机 B 均达到最终的稳态目标转速时,输出转速 n_o 也会维持在相应的稳态值,输出转矩 T_o 也不会减小. 进而,当外界有用电需求时,发动机会在原来输出功率的基础上,额外发出满足用电需求的功率,在保证其它性能的同时,持续稳定的对外进行供电.

电池功率闭环反馈控制策略和电机协调供电控制策略,共同组成了电功率协调控制策略. 该策略既保证了达到稳态时各动力元件功率分配的精确性,又能够在用电设备有用电需求时,快速而准确地协调出相应的电功率,以供使用.

3 仿真验证与结果分析

为了验证电功率协调控制策略的效果,在 Matlab 环境下,利用 Simulink、Simdriveline 以及 Simpowersystem 等中的相关模块,搭建了发动机、电池、动力耦合机构、电机、整车以及控制策略等模型,并利用该模型进行不同工况下的仿真,验证电功率协调控制策略的可行性.

针对有电功率协调控制策略和无电功率协调控制策略,进行数字仿真与分析对比. 油门踏板行程达到 60%的数据对比曲线如图 5~9 所示.

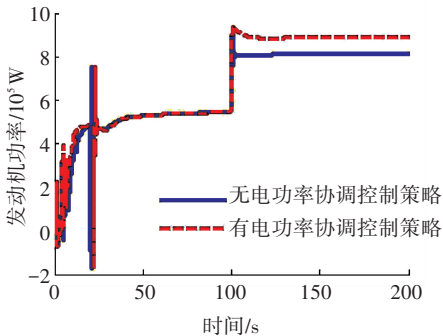


图 5 60%油门开度,发动机功率曲线

Fig.5 Engine power at 60% throttle opening

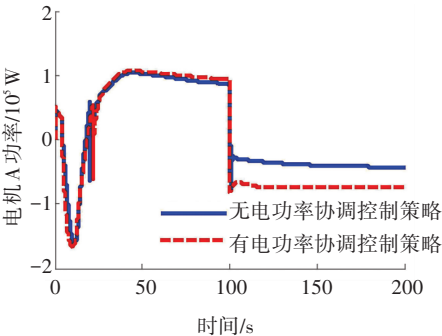


图 6 60%油门开度,电机 A 功率曲线

Fig.6 Motor A power at 60% throttle opening

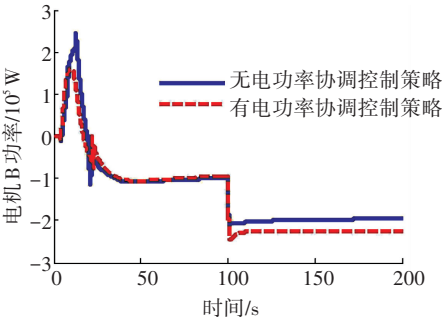


图 7 60%油门开度,电机 B 功率曲线

Fig.7 Motor B power at 60% throttle opening

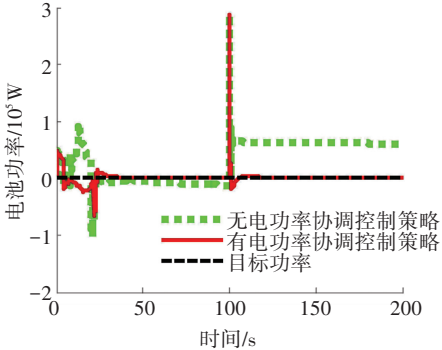


图 8 60%油门开度,电池功率曲线

Fig.8 Battery power at 60% throttle opening

由图 5~9 可知,在 100 s 时,用电设备要求系统提供 300 kW 的电能,此时,由于发动机的响应较慢,所以由电池瞬时功率提供. 之后在发动机逐渐达到预期目标,额外增加 300 kW 功率的过程中,电机 A 和电机 B 配合工作,改变自身运行状态,调整发电功率和供电功率,从而对外提供 300 kW 的电

能,以供用电设备使用,而电池则快速恢复至目标功率状态.通过图 8 可以明显看出,在有电功率协调控制策略的情况下,电池功率的调整速度明显增加,并且达到稳态时,与稳态分配目标功率相同,实现了分配的精确性.无电功率协调控制策略,不但调节速度慢,而且最终控制状态可能会偏离稳态控制目标,例如图 8 所示,系统达到稳态时,电池并未停止工作,而是以 62.8 kW 的功率继续放电,长此下去,会造成电池的过放,损害其动态性能.在偏差校正和对外供电的过程中,车辆的动力性并未受到影响,整车依旧正常驱动.

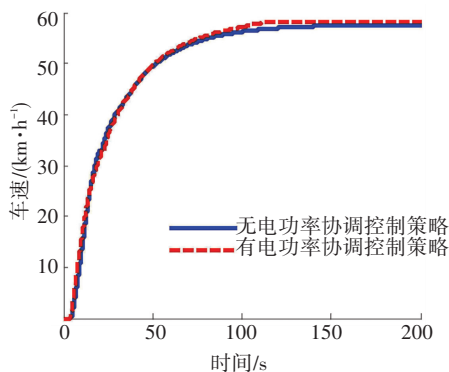


图 9 60%油门开度,车速曲线

Fig.9 Vehicle speed at 60% throttle opening

油门踏板行程达到 100% 的电功率协调控制策略下的车辆行驶状态如图 10~12 所示.

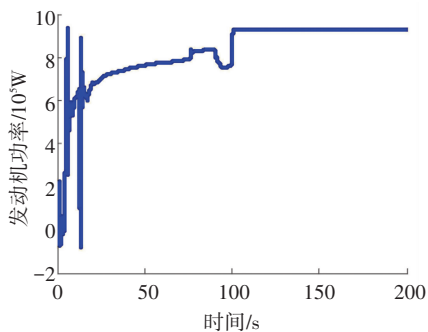


图 10 100%油门开度,发动机功率曲线

Fig.10 Engine power at 100% throttle opening

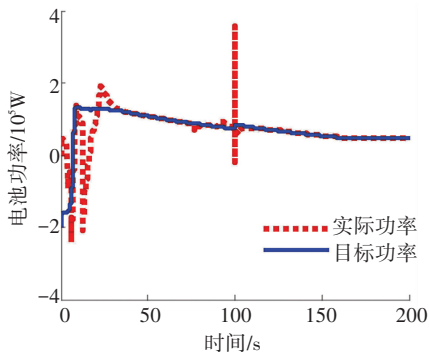


图 11 100%油门开度,电池功率曲线

Fig.11 Battery power at 100% throttle opening

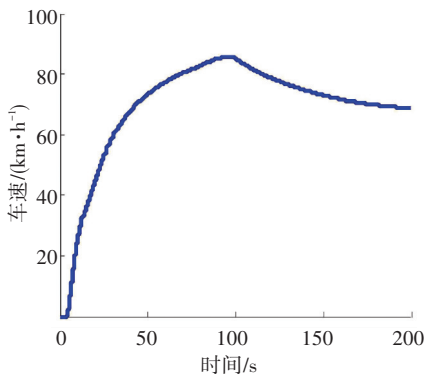


图 12 100%油门开度,车速曲线

Fig.12 Vehicle speed at 100% throttle opening

在油门踏板行程为 100% 时,在 100 s 处,同样有 300 kW 的用电功率需求.由图 11 看出,电池在瞬时提供了 300 kW 的电功率.之后发动机发挥出了最大功率,同时通过电机 A 和电机 B 的协调,电池实际功率又按照预先分派好的目标功率进行变化,不会产生偏差.但是由于发动机已经到了最大功率,供电功率和驱动功率需求的总和超出了系统可提供的功率范围,因此,在优先满足对外供电的优先级要求下,只能牺牲一定的动力性,致使车速降低.在满足对外功率需求的情况下,整车达到新的驱动平衡,该工况下车辆最终以 68 km/h 速度行驶.这是 100% 油门工况和 60% 油门工况的不同之处.

4 结 论

1) 电功率协调控制策略利用电机响应速度快和控制精度高的特点,弥补发动机响应慢和机电复合传动各传递环节效率模型不准确的缺点.当系统处于稳态时,机电功率达到精确分配,各动力源按照预先分配好的稳态目标功率进行变化;系统发生动态变化时,响应速度更快,调整更加迅速.

2) 由整车稳态目标功率分配控制策略得到各动力部件的稳态功率目标值,电功率协调控制策略则通过协调电机 A 和电机 B 的工作,实现驱动功率与供电功率的协调分配,可兼顾稳态功率分配的精确性和动态调控的响应速度,能够较好地解决机电复合传动系统机电功率精确分配和对外供电功率响应的复杂动态控制问题.

参考文献

- [1] 李宏才,闫清东,王伟达,等.双模式机电复合传动方案设计与特性对比[J].农业机械学报,2012,43(2):31-36. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.007.
- LI Hongcai, YAN Qingdong, WANG Weida, et al. Design and contrast studies of dual-mode mechanical-electronic Transmission Scheme[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):31-36. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.

- 2012.02.007.
- [2] 史广奎, 万仁君, 王仁广, 等. 通用双模式混合动力系统工作分析[J]. 中国制造业信息化, 2012, 41(17): 89–92. DOI: 10.3969/j.issn.1672–1616.2012.17.024.
- SHI Guangkui, WAN Renjun, WANG Renguang, et al. GM dual-mode hybrid system work analysis[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2012, 41(17): 89–92. DOI: 10.3969/j.issn.1672–1616.2012.17.024.
- [3] 秦大同, 彭志远, 刘永刚, 等. 基于工况识别的混合动力汽车动态能量管理策略[J]. 中国机械工程, 2014, 25(11): 1550–1555. DOI: 10.3969/j.issn.1004–132X.2014.11.024.
- Qin Datong, PENG Zhiyuan, LIU Yonggang, et al. Dynamic energy management strategy of HEV based on driving pattern recognition[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(11): 1550–1555. DOI: 10.3969/j.issn.1004–132X.2014.11.024.
- [4] 王磊, 张勇, 殷承良. 混联式混合动力客车整车控制系统的开发[J]. 汽车工程, 2012, 34(12): 1065–1071. DOI: 10.3969/j.issn.1000–680X.2012.12.002.
- WANG Lei, ZHANG Yong, YIN Chengliang. Development of the hybrid control unit for a series-parallel hybrid electric bus[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(12): 1065–1071. DOI: 10.3969/j.issn.1000–680X.2012.12.002.
- [5] LUO Y, SERRANI A, YURKOVICH S, et al. Model predictive dynamic control allocation with actuator dynamics[C]//American Control Conference, Proceedings of the 2004. Boston: IEEE, 2004: 1695–1700.
- [6] ZHU M, LIU L, ZHENG Z. Dynamic control allocation for a stratospheric airship with redundant control systems[C]//Control and Decision Conference (CCDC), 2015 27th Chinese. Qing Dao: IEEE, 2015: 2716–2723. DOI: 10.1109/CCDC.2015.7162392.
- [7] 严运兵, 颜伏伍, 杜常清. 并联混合动力电动汽车动态协调控制试验研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(1): 126–131. DOI: 10.3969/j.issn.1002–0268.2010.01.025.
- YAN Yunbing, YAN Fuwu, DU Changqing. Experimental research on dynamic coordinated control for PHEV[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(1): 126–131. DOI: 10.3969/j.issn.1002–0268.2010.01.025.
- [8] 钱立军, 邱利宏, 辛付龙, 等. 插电式四驱混合动力汽车能量管理与转矩协调控制策略[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 55–64. DOI: 10.3969/j.issn.1002–6819.2014.19.007.
- QIAN Lijun, QIU Lihong, XIN Fulong, et al. Energy management and torque coordination control for plug-in 4WD hybrid electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19): 55–64. DOI: 10.3969/j.issn.1002–6819.2014.19.007.
- [9] 李孟海, 罗禹贡, 杨殿阁, 等. 基于模型匹配控制的 PHEV 动态协调控制方法[J]. 汽车工程, 2007, 29(3): 203–207. DOI: 10.3321/j.issn.1000–680X.2007.03.007.
- LI Menghai, LUO Yugong, YANG Diange, et al. A dynamic coordinated control method for parallel hybrid electric vehicle based on model-matching-control[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(3): 203–207. DOI: 10.3321/j.issn.1000–680X.2007.03.007.
- [10] 杜波, 秦大同, 段志辉, 等. 新型并联式混合动力汽车模式切换协调控制[J]. 中国机械工程, 2012, 23(6): 739–744. DOI: 10.3969/j.issn.1004–132X.2012.06.024.
- DU Bo, QIN Datong, DUAN Zhihui, et al. Coordinated control for mode switch of a new parallel HEV[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(6): 739–744. DOI: 10.3969/j.issn.1004–132X.2012.06.024.
- [11] 赵峰, 罗禹贡, 张娜, 等. 混合动力汽车发动机转矩突变过程动态协调控制[J]. 汽车工程, 2014, 36(11): 1334–1338.
- ZHAO Feng, LUO Yugong, ZHANG Na, et al. Dynamic coordinated control for hybrid electric vehicles in the process of engine torque abrupt change[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(11): 1334–1338.
- [12] 赵治国, 代显军, 王晨, 等. 复合功率分流混合电动轿车驱动模式切换的协调控制[J]. 汽车工程, 2015, 37(3): 260–265.
- ZHAO Zhiguo, DAI Xianjun, WANG Chen, et al. Coordinated control of driving mode switching of compound power-split hybrid electric car[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(3): 260–265.
- [13] 王庆年, 冀尔聪, 王伟华. 并联混合动力汽车模式切换过程的协调控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(1): 1–6.
- WANG Qingnian, JI Ercong, WANG Weihua. Coordinated control for mode-switch of parallel hybrid electric vehicle[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(1): 1–6.
- [14] JALIL N, KHEIR N A, SALMAN M. Rule-based energy management strategy for a series hybrid vehicle[C]//Proceedings of the American Control Conference. Piscataway: IEEE, 1997: 689–693. DOI: 10.1109/ACC.1997.611889.
- [15] 王伟达, 项昌乐, 刘辉, 等. 混联式混合动力系统多能源综合控制策略[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(1): 138–143. DOI: 10.11918/j.issn.0367–6234.2012.01.027.
- WANG Weida, XIANG Changle, LIU Hui, et al. Design and validation of hybrid control strategy for parallel-series HEV[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(1): 138–143. DOI: 10.11918/j.issn.0367–6234.2012.01.027.
- [16] 郑海亮, 项昌乐, 王伟达, 等. 双模式机电复合传动系统综合控制策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 43(2): 311–317. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201402006.
- ZHENG Hailiang, XIANG Changle, WANG Weida, et al. Design and validation of control strategy for dual-mode electro-mechanical transmission[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 43(2): 311–317. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201402006.

(编辑 杨波)