

# 电传动推土机牵引性能匹配的变压控制方法

李文嘉<sup>1,2</sup>, 王安麟<sup>1,2</sup>, 李晓田<sup>1,2</sup>, 宋润州<sup>3</sup>

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 同济-山推工程机械综合技术研究院, 上海 201804;

3. 山推工程机械股份有限公司, 山东 济宁 272073)

**摘要:** 电传动推土机动力总成包括发动机、发电机、超级电容以及轮边驱动电机,其载荷变化范围大且具有突变性的动力学特征,使发电机与电动机难以实现全局功率匹配。针对电传动推土机动态牵引性能匹配这一关键问题,提出基于双 DC-DC(直流-直流)变换器的直流母线电压变压控制方法。即在直流母线与发电机之间加入 DC-DC 变换器,控制发电机的额定电压工作点,实现发动机在额定工况点工作的高效目标;在直流母线与电动机之间加入 DC-DC 变换器,根据实时载荷所表达的系统状态变矢量调节变压系数,控制发电机与电动机相对于载荷变化的动力学匹配关系,使发电机与电动机在全载荷意义上实现功率匹配,保证其牵引性能的发挥。通过某型号推土机开发过程性能匹配及其系统数字化模型仿真试验,验证了基于双 DC-DC 变换器的直流母线电压变压控制方法的有效性。

**关键词:** 电传动推土机; 变压控制; 功率匹配; DC-DC 变换器; 全载荷

**中图分类号:** TH113

**文献标志码:** A

## Voltage Transformation Control Method for Traction Dynamic Characteristic Match of Electric Drive Bulldozer

LI Wenjia<sup>1,2</sup>, WANG Anlin<sup>1,2</sup>, LI Xiaotian<sup>1,2</sup>, SONG Runzhou<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Tongji-Shantui Construction Machinery Synthesized Technology Academe, Shanghai 201804, China; 3. Shantui Construction Machinery Co. Ltd., Jining 272073, China)

**Abstract:** The power assembly of electric drive bulldozer consists of an engine, a generator, a super capacitor and direct wheel drive motors. The extensive-change and mutability load characteristic makes it hard for the generator and the motors to achieve power matching on the whole-load.

To solve the key problem of the traction dynamic characteristic match of electric drive bulldozer, a voltage transformation control method for direct current bus voltage based on double DC-DC (direct current-direct current) converters was proposed in this paper. The method is to add a DC-DC converter between the generator and the direct current bus, which can control the rating voltage work point of the generator, to realize the high-efficient objective of the engine working on the rating work condition point; and to add a DC-DC converter between the direct current bus and the motor, which can regulate the voltage transformation coefficient according to the system state variant vector expressed by real-time load, to control the dynamics matching relationship of the generator and the motors when the load varies, to realize the power matching between the generator and the motors in a whole-load sense, and guarantee the traction characteristic to be unleashed. The validity of the voltage transformation control method for direct current bus voltage based on double DC-DC converters was proved, through the developing performance matching and the digital emulation model of some model bulldozer.

**Key words:** electric drive bulldozer; voltage transformation control; power matching; DC-DC converter; whole-load

目前投入市场的电传动推土机只有美国卡特彼勒公司研制的 D7E 型推土机<sup>[1]</sup>, 国内的电传动推土机尚处在整机调试阶段<sup>[2-3]</sup>。电传动的高效性、易控制性等特点, 决定了其在节能方面有较好的发展空间, 但由于其载荷波动范围大, 其动态牵引性能匹配控制成为制约其性能的核心问题。

对于电传动系统的控制, 电传动汽车的控制系統发展已较为成熟<sup>[3-6]</sup>, 但电传动汽车载荷波动小, 其控制系统不适用于载荷波动剧烈的电传动推土

收稿日期: 2014-01-03

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2011BAG04B00)

第一作者: 李文嘉(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为工程机械一体化匹配、液力变矩器。E-mail: pigeon\_lwj\_1989@126.com

通讯作者: 王安麟(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程机械、智能设计、机电一体化、微机械等。

E-mail: wanganlin@tongji.edu.cn

机.对于载荷波动同样剧烈的履带式电传动系统,较多研究主要针对电机的控制方案及能量分配<sup>[7-8]</sup>,仅有少量文献研究控制策略<sup>[1,2,9-10]</sup>,且这些文献研究的是整机转向时动力分配的原则以及整机控制策略,没有涉及传动系统上电的控制方法,也没有解决载荷大范围变化时,发电机与电动机动态匹配问题.

电传动系统动态牵引性能匹配控制的根本问题是控制电压.目前控制电压的最常用元件是DC-DC(直流-直流)变换器,其在电传动系统中主要应用在超级电容与直流母线之间,通过检测直流母线电压及PWM(pulse width modulation)控制,调节DC-DC变换器输出端的电压,维持直流母线电压的稳定或超级电容输出功率恒定<sup>[6]</sup>.因此,将DC-DC变换器与电传动推土机结合,调节各核心部件的工作电压,可能成为解决电传动推土机动态性能匹配的技术路线,具有研究价值.

## 1 面向电传动推土机全载荷的牵引性能匹配

推土机工况恶劣,其载荷具有较强的波动性和随机性,这要求电传动推土机传动系统可以实时根据载荷大小进行自适应的调节控制,以使各个元器件的效率较高,输出与负载相适应的功率.这两点是传动系统的控制目标,也是电传动推土机动态牵引性能匹配的指导思想.

电传动推土机的传动系统如图1中实线框所示,其工作原理是:柴油机产生机械能,经过分动箱分配能量,大部分能量传递到发电机,发电机将机械能转换成三相交流电,经整流器变成直流电,经过超级电容稳压,再将直流电通过逆变器转换成三相交流电传递给电动机,电动机将电能转换成机械能,经制动器、终传动作用在履带和土壤上.

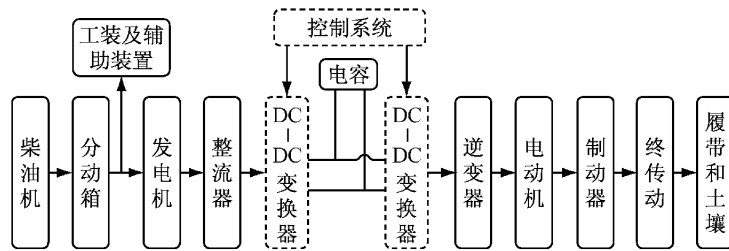


图1 电传动推土机传动系统

Fig.1 Transmission system of electric drive bulldozer

根据键合图理论、元器件参数和上述传动系统,可以建立电传动推土机各个元器件的数学模型,进而搭建传动系统数字化模型.通过对传动系统数字化模型的仿真研究,发现整机输出功率、效率均较低,进一步观察发现,直流母线电压较低,只有500 V左右(发电机、电动机的额定电压为600 V).对柴油机模型、分动箱模型、发电机模型、整流器模型组成的模块(下文简称前部分)和逆变器模型、电动机模

型组成的模块(下文简称后部分)分别进行研究,可以得到不同直流母线电压下柴油机、发电机、电动机的功率、效率,如图2所示.由图2可知,柴油机、发电机、电动机的功率、效率随电压增大而增大.可见,上述传动系统数字化模型整机输出功率、效率低,是直流母线电压过低导致的.

通过对前、后部分的研究,还可以得到不同直流母线电压下前部分输出的电流和后部分吸收的电

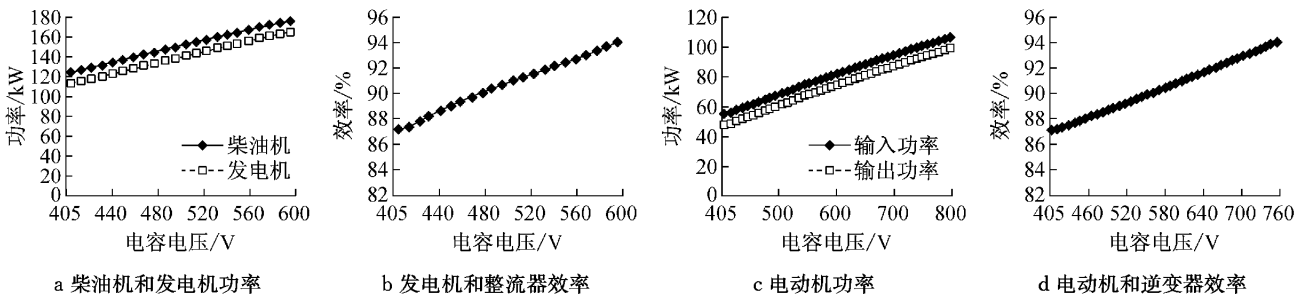


图2 关键元器件功率、效率与电压的关系

Fig.2 Relationship between power and efficiency of key components and voltage of capacitor

流,如图 3 所示.前部分输出给超级电容的电流反映前部分给超级电容充电的速度,超级电容输出给后部分的电流反映超级电容放电的速度.若超级电容电压(即直流母线电压)可以稳定,则超级电容充、放电速度实现动态平衡,即前、后部分的电流动态相等.由图 3 可知,前、后部分的电流在直流母线电压 500 V 左右时相等,所以传动系统数字化模型仿真时直流母线电压只有 500 V.从根本上讲,电容充电速度反映前部分产生功率,电容放电速度反映后部分消耗功率.电容电压较低,本质上是后部分功率大于前部分功率,即发电机、电动机的功率匹配较差.

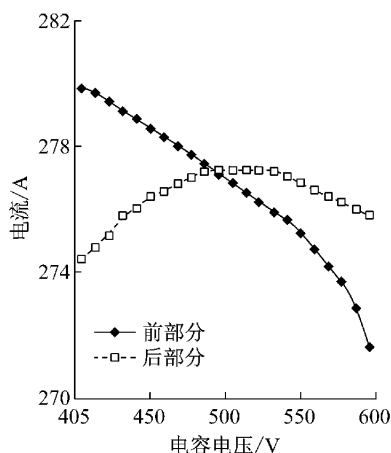


图 3 前、后部分电流与电容电压的关系

Fig. 3 Relationship between current of former and latter part and voltage of capacitor

发电机、电动机的额定电压是 600 V,若发电机、电动机工作在额定电压,则需提高前部分发电功率,或降低后部分耗电功率.从图 2 可以看出,发电机、电动机的功率随直流母线电压的增大而增大.因此,采用变压控制法,即在直流母线与前部分之间、直流母线与后部分之间分别加入 DC-DC 变换器,使前后部分工作在不同的电压下,进而改变前后部分的功率,以实现前后部分功率匹配.通过一些简单的控制,还可以使前部分工作在某一固定电压下,进而使柴油机、发电机可以长时间工作在额定工况点附近,有利于延长元器件的寿命.

## 2 基于双 DC-DC 变换器的直流母线电压变压控制方法

本文所述变压控制法,是在直流母线与发电机之间、直流母线与电动机之间分别加入直流变压器,通过控制系统实时调节直流母线与元器件的电压比例关系,如图 1 中虚框所示.为实现实时调整电压比

例,本文采用直流变压的主流产品 DC-DC 变换器.

目前 DC-DC 变换器在电传动系统中的主要应用位置是直流母线和超级电容之间.为控制直流母线电压与元器件之间的电压关系,改变 DC-DC 变换器在电传动系统中传统的位置,将其放在直流母线与前部分之间以及直流母线与后部分之间.

直流母线与前部分之间的 DC-DC 变换器的作用是:在整机工作时,始终通过 PWM 控制,保持前部分工作在某一固定电压下(如发电机的额定电压),以使前部分工况稳定.如果发电机、柴油机选型合理,则其可以工作在额定工况点附近,有利于延长元器件寿命,并充分发挥柴油机、发电机作用.

直流母线与后部分之间的 DC-DC 变换器的作用是:在整机正常工作时,实时根据当前电动机转速、柴油机油门、负载大小、直流母线电压以及当前变压系数,确定下一时刻 DC-DC 变换器的变压系数,并通过 PWM 控制,使得后部分工作在某一合适电压下,以满足速度、负载确定下来的功率需求,使整机有更好的输出特性.

上述两个 DC-DC 变换器可以分别调节前、后部分与直流母线之间的电压比例,以使前、后部分工作在不同的电压下,进而实现前、后部分的功率匹配,解决上述问题.

本文所用的 DC-DC 变换器在工作时有升压、降压两种工况,因此采用双向 DC-DC 变换器.本文侧重于 DC-DC 变换器在整机上的应用,因此从工程的角度进行简化,不建立 PWM 控制的 DC-DC 变换器的详细模型,仅根据仿真要求建立可以实现电压升降,同时保证 DC-DC 变换器两端功率相等的模型.

下面以直流母线与后部分之间的 DC-DC 变换器(下文简称“后变换器”)为例具体说明 DC-DC 变换器的建模思路.通过外部输入信号确定 DC-DC 变换器的放大(或缩小)倍数,这里称为“变压系数”.直流母线电压乘以变压系数,作为后部分工作电压;同时,后部分反馈电流乘以变压系数,作为反馈给直流母线的电流,以保证 DC-DC 变换器两端功率相同.当变压系数大于 1 时,DC-DC 变换器处在升压工况;当变压系数小于 1 时,DC-DC 变换器处在降压工况;当变压系数等于 1 时,DC-DC 变换器不起变压作用.

直流母线与前部分之间的 DC-DC 变换器(下文简称“前变换器”)建模思路及原理与后变换器相同,但前变换器的功能是保持前部分工作在某一恒定电压下,为满足此功能,需使前变换器始终向前部分输

出一固定电压,此固定电压除以直流母线电压再乘以前部分输出的电流,作为输送到直流母线上的电流,以满足前变换器两端功率守恒。

电传动推土机的变压控制法将 DC-DC 变换器与电传动推土机结合,通过改变直流母线与元器件之间的电压比来改变元器件的工作电压,进而提升元器件之间的功率匹配。变压控制法所应用的物理元器件是 DC-DC 变换器,其在工程化及仿真中都比较容易实现。

### 3 电传动推土机牵引性能匹配的仿真验证

推土机是一个多模块的复杂系统,具有多能态、强动态等特点,根据其特点,本文应用键合图理论<sup>[11]</sup>,以模块化的方法搭建其传动系统的数字化模型。根据表 1 所示的推土机参数及相关资料,利用 MATLAB 下的 Simulink 模块进行仿真调试。此模型可以调节各元器件内部参数;调节油门开度、电机转速等与驾驶员输入相关的参数;观测整车速度、发动机功率、各元器件功率、效率等物理量。针对本文研究的变压控制法,在数字化模型中的适当位置加入两个 DC-DC 变换器模型,并与没有加入 DC-DC 变换器模型的整机系统进行最能反映整机特性的整机牵引特性(静态)与典型工况(动态)的对比,观察两个模型的发动机功率、整车速度、整车牵引力、整机功率。

表 1 推土机传动元件基本参数

Tab.1 Basic parameters of transmission components of bulldozer

推土机类型	传动元件	基本参数
液力传动推土机	柴油机	型号:WP12
	柴油机	型号:WP10
电传动推土机	发电机	永磁同步电机,额定电压 600 V
	电动机	永磁同步电机,额定电压 600 V
	超级电容	电容容量 5 F,额定电压 600 V

对于应用变压控制法的电传动推土机,其控制系统框图如图 4 所示。其根据发电机的额定电压确定前变压器反馈给发电机的电压,并根据电容电压确定前变压系数;根据电容电压、油门、速度、负载、当前的后变压系数实时确定下一时刻的后变压系数。

#### 3.1 静态特性对比

推土机的牵引特性是反应推土机静态牵引性能的重要指标,其表示推土机在水平路面上以全油门

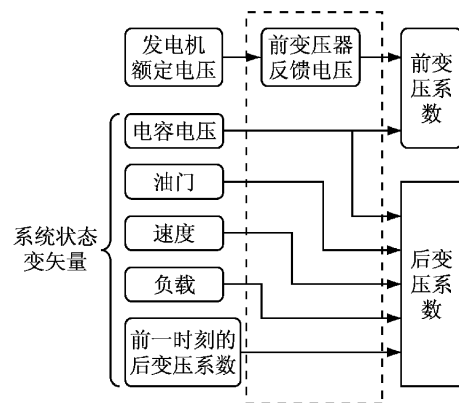


图 4 电传动推土机控制系统框图

Fig.4 Control system block diagram of electric drive bulldozer

作匀速运动时,速度随牵引力变化的函数关系。牵引特性的好坏直接决定推土机在不同作业环境下能否发挥最佳牵引功率<sup>[12]</sup>。

如前所述,前变换器的作用是控制前部分工作在某一固定电压下,以延长前部分元器件寿命,并尽可能发挥其功能。根据此作用,控制前部分工作在发电机的额定电压 600 V 下。后续仿真证明,此状态下,柴油机转速  $1\,750\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,接近其额定转速。后变换器的作用是根据速度、负载实时调整变压系数,使后部分消耗的功率与前部分产生的功率匹配,以提高直流母线电压,进而使后部分输出足够的功率,满足牵引功率的需求。

为研究前、后变换器对整机牵引特性的影响,本节建立不加变换器、只加入前变换器、只加入后变换器的三个电传动推土机传动系统模型,并与相似型号液力传动推土机传动系统模型进行牵引特性对比。

根据文献<sup>[13]</sup>所研究相似型号推土机的载荷谱特征,结合某企业提供的相关资料,取满油门开度,测试整机在不同负载下(0~220 kN,每 10 kN 测试一次)速度,得到整机的外特性曲线。为方便观察对比,将液力传动推土机三个档位的牵引特性曲线取其最大值,整合成一条曲线。四个传动系统的外特性曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出:电传动推土机与液力传动推土机的牵引特性曲线趋势相近,这证明电传动推土机产品满足设计要求;不加变压控制法时,电传动推土机在中负载区牵引性能略差于液力传动推土机;加入变压控制法时,电传动推土机牵引性能全面超越液力传动推土机;在应用变压控制法之后,电传动推土机的牵引特性有所提升,尤其是低、中负载区,

相同牵引力下,速度可以提升 12%。

对比三个电传动推土机模型的超级电容电压,如图 6 所示。从图 6 可以看出,加入变压控制法时,前后部分功率匹配更好,超级电容的电压显著提高,这也是整机牵引力提高的根本原因。

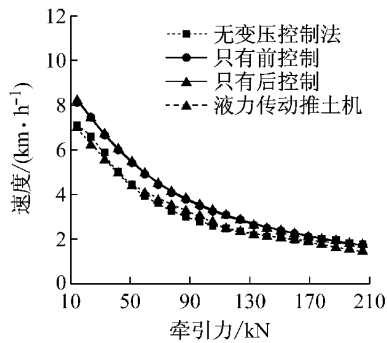


图 5 牵引特性对比

Fig. 5 Contrast of tractive characteristics

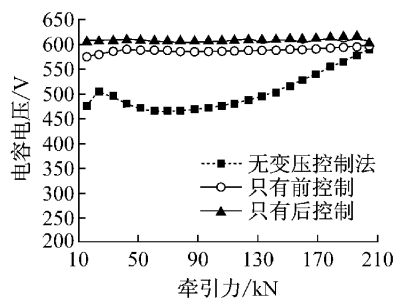


图 6 电容电压对比

Fig. 6 Contrast of voltage of capacitor

### 3.2 动态特性对比

选取空载、铲土、运土典型工况,对比液力传动推土机、有变压控制法的电传动推土机、没有变压控制法的电传动推土机的传动系统。因键合图决定的势流关系以及仿真记录的数据限制,三个系统难以一起比较,因此对应用变压控制法的电传动推土机与液力传动推土机进行对比,再对应用与没有应用变压控制法的电传动推土机进行对比,对比的物理量包括速度、牵引力、电容电压、发动机功率、整机效率等。

对于应用变压控制法的模型,前变换器将 600 V 额定电压反馈给前部分,以使前部分元器件工作在额定工况点附近;后变换器根据系统状态变矢量实时调整变压系数,以满足后部分功率需求及前后部分的功率匹配。

选取柴油机满油门、超级电容初始电压 490 V,对于相同的负载函数,仿真有变压控制法的电传动推土机与液力传动推土机,可以得到如图 7 所示的

结果。

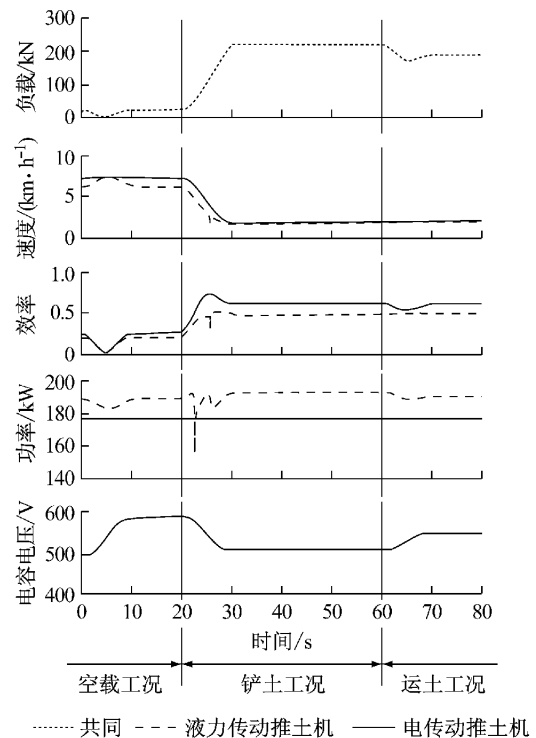


图 7 有变压控制法的电传动推土机与液力传动推土机的典型工况对比

Fig. 7 Contrast of typical working conditions between electric drive bulldozer with voltage transformation control method and hydraulic transmission bulldozer

通过图 7 可以看出,电传动推土机在效率、速度等方面都优于液力传动推土机:在空载工况下,电传动推土机的速度明显高于液力传动推土机的速度;在铲土和运土工况,电传动推土机的效率明显高于液力传动推土机的效率;在整个工况,电传动推土机的发动机功率都低于液力传动推土机,且更稳定。超级电容在空载工况和运土工况充电,在铲土工况放电,配合发动机合理分配了能量。

选取柴油机满油门、超级电容初始电压 420 V,输入相同的目标转速函数,运行两个电传动推土机传动系统,可以得到如图 8 所示的结果。

通过两个整机系统的仿真模型对比可以发现:在速度接近的情况下,应用变压控制法的整机系统可以提供更大的牵引力,提升约 30%;电容电压变化幅度更大,说明超级电容更有效地发挥了作用;发动机功率更稳定,有利于发动机工作在额定工况点;整机效率更高。

可见,应用变压控制法,可以使电传动推土机输出更大的牵引力,超级电容发挥更大的作用,发动机

工况更平稳,整机效率更高。

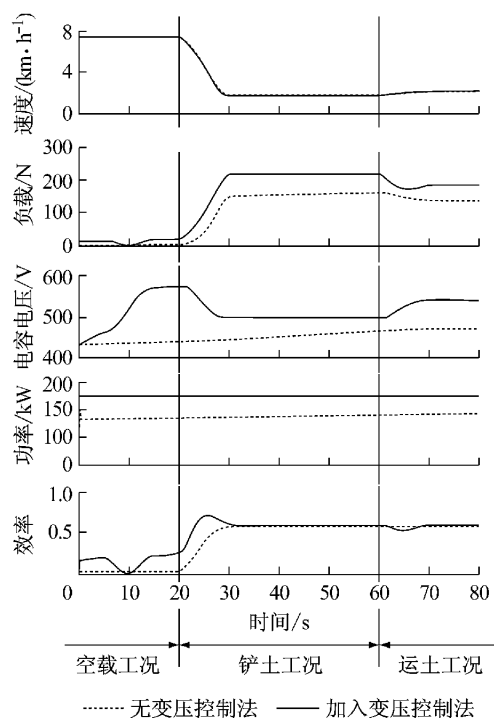


图8 有、无变压控制法的电传动推土机典型工况对比

Fig. 8 Contrast of typical working conditions between electric drive bulldozers with and without voltage transformation control method

## 4 结语

(1) 论文通过某型号推土机开发过程性能匹配及其系统数字化模型仿真实验,证明了基于双DC-DC变换器的直流母线电压变压控制方法的有效性,可满足在其作业负载变化较大条件下,实现全载荷下的功率匹配。

(2) DC-DC变换器的物理元器件已产品化,面向电传动推土机牵引性能匹配的变压控制方法的控制系统硬件构成具有工程化成本低、易实现的特点。

(3) 本文以电传动推土机牵引性能控制研究为对象,实现了复杂载荷条件与机电大系统性能的一体化匹配,其研究方法对同类问题具有借鉴性。

## 参考文献:

[1] 邵长伟. 电传动推土机双侧驱动控制策略与仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.  
SHAO Changwei. Research on bilateral drive control strategies and simulation of electric-drive dozer [D]. Changchun: Jilin University, 2013.

[2] 石松山,李涛,孔德文. 电传动推土机曲线作业的控制仿真研究[J]. 工程机械, 2012,8(10-14):111.  
SHI Songshan, LI Tao, KONG Dewen. Research on curve operations control and simulation of electric-drive dozer [J]. Construction Machinery and Equipment, 2012,8(10-14):111.

[3] Sekour M, Hartani K, Draou A, *et al.* Sensorless fuzzy direct torque control for high performance electric vehicle with four in-wheel motors [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2013,5: 530.

[4] Kang J, Choi W, Kim H. Development of a control strategy based on the transmission efficiency with mechanical loss for a dual mode power split-type hybrid electric vehicle [J]. International Journal of Automotive Technology, 2012,8: 825.

[5] 叶建红,陈小鸿. 纯电动汽车供能策略研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2011,39(10):1531.  
YE Jinghong, CHEN Xiaohong. Energy supply strategy for battery electric vehicles [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011,39(10):1531.

[6] 陈立超,张昕,张欣. 超级电容式混合动力电动汽车控制策略的研究[J]. 北京汽车,2011,39(2):9.  
CHEN Lichao, ZHANG Xin, ZHANG Xin. Research on control strategies of hybrid electric vehicle with super capacitor [J]. Beijing Automotive Engineering, 2011,39(2):9.

[7] LIU Long, ZHAI Li, FENG Huixia, *et al.* Effects of dynamic characteristics of motor on steering dynamics of electric drive tracked vehicle [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2011,12: 149.

[8] ZOU Yuan, SUN Fengchun, ZHANG Chengning, *et al.* Optimal energy management strategy for hybrid electric tracked vehicles [J]. International Journal of Vehicle Design, 2012,6: 307.

[9] 吴静波,张承宁,邹渊. 基于电压控制的混合动力履带车辆控制策略研究[J]. 车用发动机,2009(4):45.  
WU Jingbo, ZHANG Chengning, ZOU Yuan. Research on control strategy of hybrid tracked vehicle based on voltage control [J]. Vehicle Engine, 2009(4):45.

[10] CHEN Zeyu, ZHAO Guangya, ZHANG Chengning, *et al.* Control strategy for hybrid tracked vehicles using fuzzy logic [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2013,6: 202.

[11] 王中双. 键合图理论及其在系统动力学中的应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2007.  
WANG Zhongshuang. Bond graph theory and application on systematic dynamics [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2007.

[12] 杨兴菊. 液力机械式推土机牵引性能参数匹配研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.  
YANG Xingju. Research of traction performance parameters matching for hydraulic mechanical bulldozer [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

[13] 孙强,白书战,李国祥,等. 履带式推土机动力传动系统推土工况建模与仿真[J]. 农业工程学报,2012,28(7):57.  
SUN Qiang, BAI Shuzhan, LI Guoxiang, *et al.* Modeling and simulation of power transmission of crawler bulldozer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012,28(7):57.