doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.01.038

液电混动履带底盘电液系统联合仿真与试验

韩明兴　徐　琨　廖宜涛　李　淼　余　锴
（华中农业大学工学院，武汉 430070）

摘要：针对传统以液压驱动或纯电驱动的履带式农机装备功耗大、系统响应慢、电池续航短、功率扭矩输出不足等问题，本文提出了一种高效液电混动履带式行走底盘，集成了液压驱动和电驱动两套独立动力系统，双液压马达及双伺服电机的四轮驱动结构，可实现整机大扭矩输出，利于整机轻量化设计；通过伺服电机速度及力闭环控制，适应匹配底盘外负载的变化，可显著改善闭式液压驱动系统的动态输出特性，提高整机动态控制性能并降低工作能耗。基于 AMESim 与 Matlab 建立了电液混动系统的联合仿真模型，对比分析整机在平地直线行驶、山地爬坡、原地转向等不同工况的行驶动态性能，试验结果表明所设计的液电混合驱动履带底盘最大行驶速度可达 1.1 m/s，原地转弯时间最快为 2.4 s，最小转弯直径为 150 cm，可实现丘陵山地复杂地形转弯及调头；履带底盘直线行驶偏移率不大于 3.3%；在相同工况下与液压驱动相比，液电混合动模式下整机能耗可减少 9.3%，提高了整机工作效率。

关键词：履带底盘；液电混动；行驶性能；联合仿真
中图分类号：S232.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)01-0396-13　　**OSID**：

Co-simulation and Test of Electro－Hydraulic System of Novel Hybrid Track

HAN Mingxing　XU Kun　LIAO Yitao　LI Miao　YU Kai
(*College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Traditional hydraulic or pure electric driven tracked agricultural machinery equipment has problems such as high-power consumption, response lag, short battery life, and insufficient power and torque output. A type of high-efficiency electro－hydraulic track chassis was proposed, which integrated two independent power systems of hydraulic drive and electric drive, four-wheel drive structure with two hydraulic motors and two servo motors. It can realize the use of small power engine to output large torque, which was conducive to the lightweight design. At the same time, the speed and torque closed-loop control of the servo motor can adapt to the changes of the external load of the matching chassis, which can significantly improve the dynamic output characteristics of the closed hydraulic drive system, improve the dynamic control performance of the whole machine and reduce the energy consumption. A co-simulation model of the electro－hydraulic system was established based on AMESim and Matlab. The simulation compared and analyzed the driving performance of the whole machine under different working conditions, such as straight driving on flat ground, mountain climbing and in-situ steering. The prototype test results showed that the maximum speed of the electro－hydraulic drive track chassis was 1.1 m/s, the fastest turning time was 2.4 s, and the minimum turning diameter was 150 cm, which can realize turning and turning around on the complex terrain of hills and mountains. The offset of track chassis in a straight line was less than or equal to 3.3%. Compared with the hydraulic drive under the same working conditions, the electro－hydraulic mode can reduce the energy consumption of at least 9.3%, effectively reduce the energy consumption and improve the working efficiency of the whole machine.

Key words: track chassis; electro－hydraulic; driving performance; co-simulation

收稿日期：2023－08－15　修回日期：2023－11－14
基金项目：国家自然科学基金项目(32101627)
作者简介：韩明兴(1986—)，男，讲师，博士，主要从事农机装备机电液一体化设计研究，E-mail：hmx524@126.com
通信作者：廖宜涛(1982—)，男，教授，博士生导师，主要从事现代农业装备设计与测控研究，E-mail：liaoetao@mail.hzau.edu.cn

0　引言

履带底盘在农业生产中应用广泛[1]，传统履带底盘驱动方式可分为液压驱动和电驱动[2-3]。液压驱动式履带底盘在田间复杂恶劣工况下工作时[4]，由于外负载非线性及复杂多变的工作环境，不仅会降低发动机工作效率，还会造成液压系统工作压力的剧烈振荡，使得整车油耗增加，产生严重发热与振动噪声，能量转换效率低。电驱动履带底盘在噪声控制、响应速度和节能环保方面具有明显优势，但其在恶劣工况下尚存在动力、扭矩及续航不足等缺点[5-7]。

针对山区、丘陵田块面积小、土壤黏湿松软、厢面不平整、厢间开有畦沟等地形复杂的环境，一般要求农业机械底盘具备结构紧凑、整机质量小、良好的田间通过性和适应性等基本特点[8]，为此国内外展开了众多研究[9-13]。郭凯文[14]基于多体动力学软件 RecurDyn 对履带底盘的通过性进行了仿真分析，设计改装了轻型履带底盘，并进行田间试验验证了设计方法的可行性。彭姣春[15]设计了一种履刺高度可调式履带底盘，通过适当调节履刺高度来提高履带底盘在湿软水田中的抓地力和通过性。YANG 等[16]基于静液压驱动履带车辆转向理论，深入研究了高速静液压驱动履带车辆的转向控制策略。ZHANG 等[17]研究了静液压传动高速履带车辆的动力协调分配控制技术，腾飞等[18]从提高液压泵效率的角度，对比研究了履带车辆液压辅助制动控制方法。曹付义等[19]根据方向盘转角和液压先导阀杆摆角的变化关系，推导出凸轮曲线的解析表达式，分析了方向盘操纵系统的工作稳定性及跟随特性。DU 等[20-22]提出了一种基于强化学习和深度强化学习的混合动力履带式车辆能量管理算法。YUAN 等[23]提出了一种基于强化学习的实时能量管理策略。WEI 等[24]探讨了利用 Radau 伪谱方法(RPM)优化混合动力履带车辆能量管理策略的可行性。

上述研究提升了丘陵地区履带底盘机械化水平，但是目前履带拖拉机仍然存在发动机能耗高、液压系统能效低等问题。基于此，在前期高地隙履带自走式油菜割晒机[25]和龙门式电驱动油菜薹收获机[26]相关设计及研究基础上，本文提出一种新型液电混合驱动的履带式底盘，设计基于电驱动和液压驱动的双驱动系统，建立包含液压传动及电传动的多系统联合仿真模型[27-29]，仿真对比分析履带底盘多工况行驶性能，研究底盘双驱动系统工作效率，开展样机多工况行驶性能试验测试，以期为液电混动履带底盘设计提供参考。

1　液电混动履带底盘整体结构与工作原理

1.1　整体结构

液电混合驱动履带式行走底盘驱动系统主要由液压驱动系统和电驱动系统两部分组成(图 1)，整车共 4 个驱动轮，采用车体张紧机构，前驱动轮为液压驱动，后驱动轮为电机驱动。整机采用柴油机与小型增程器的双动力源结构，相比只用柴油机同时驱动液压泵与发电机的单动力源结构，实现液压驱动系统和电驱动系统启停互不干扰，可进一步提高柴油机工作效率，在安装及布置方面也更加便捷。

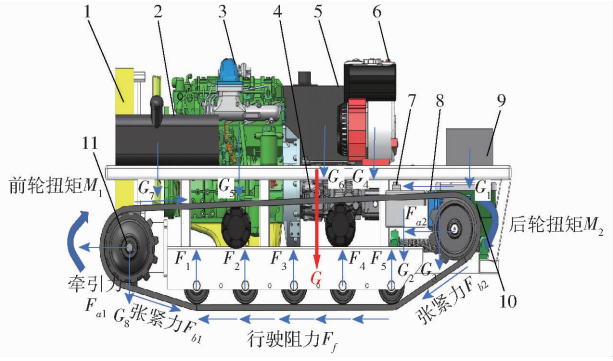


图 1　混合动力履带底盘三维模型

Fig. 1　3D model of hybrid track chassis

1. 散热单元　2. 液压油箱　3. 柴油机　4. 变量泵　5. 油箱　6. 增程器　7. 电机　8. 减速器　9. 电池组　10. 驱动器　11. 液压马达

液电混动履带底盘主要技术参数如表 1 所示，其中电驱动系统主要包括左右电机、减速器、电机驱动器和电池组等，液压驱动部分主要由变量泵、减速器、液压马达和散热器等组成，液压马达与变量泵直接连接(无轮边减速器)，单侧履带最大输出扭矩为 1 200 N·m。同时，行走系统采用左右对称布置，左右驱动可以耦合工作，也可以独立工作，可更好地适应不同工况。

表 1　液电混动履带底盘主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of hydraulic electric hybrid track chassis

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	1.8×1.2×0.8
整机质量/kg	900
柴油机功率/kW	31
电机功率/kW	2
整机功率/kW	35
额定负载/kg	300
最大负载/kg	500
单侧履带最大输出扭矩/(N·m)	1 200

混动底盘中柴油机质量为 230 kg，电机质量为 16 kg×2，电池质量为 3.8 kg×4，综合质量为

277.2 kg。同功率等效柴油机质量为 276 kg,总质量几乎相等,但液压系统管路、油箱及油液的质量会增加 10% ~20%。因此综合考虑,相比同功率柴油机履带底盘混动式底盘可减质量近 50 kg,混动履带底盘可实现轻量化设计。

1.2 工作原理

液电混合驱动履带底盘工作原理如图 2 所示,其主要由电驱动系统、控制系统和液压驱动系统三大部分组成。整机动力由柴油机与增程器提供,柴油机为液压系统提供动力,增程器为电驱动系统提供持续电能。液压驱动动力系统采用双变量泵分别独立驱动左右行走液压马达的对称闭式液压回路,采用泵控容积调速,可减小油箱容积,实现液压系统轻量化、简洁化设计。

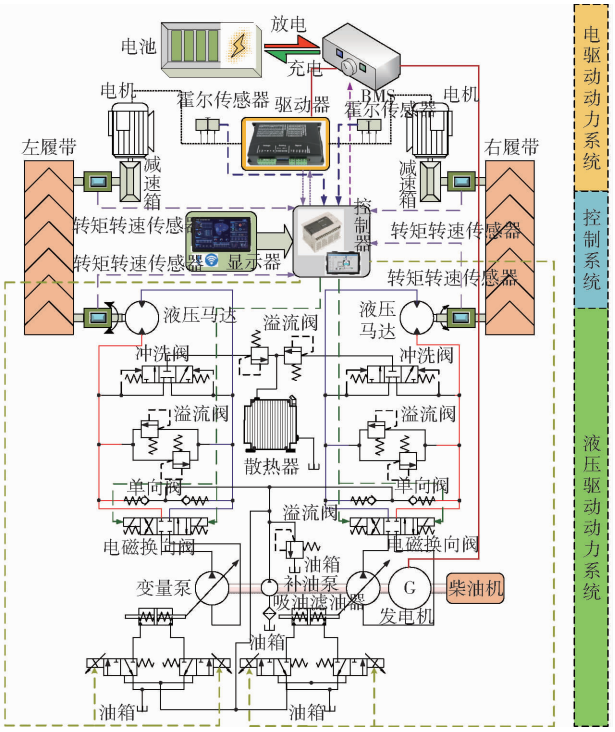


图 2 液电混合驱动履带底盘整车原理图

Fig. 2 Schematic of whole vehicle of hybrid hydraulic drive track chassis

液电混合驱动履带底盘综合液压系统功率密度大和电控系统响应速度快的优点,由液压马达承担大部分负载载荷,电动机承担剩余部分,其主要有两种工作模式:液压驱动模式和混合驱动模式。对于液压驱动模式,控制系统给变量泵发出控制信号,变量泵将柴油机的机械能转换为液压能,驱动前驱动轮转动,进行容积调速控制,此时电驱动系统不工作;对于混合驱动模式,整车由液压驱动与电驱动系统共同驱动,此时前轮采用液压驱动,后轮采用电驱动,柴油机和增程器同时工作。

整车安装了不同类型传感器,控制器接收传感器信号并进行反馈运算,实时发出控制指令,控制两个驱动系统进行动力耦合,实现整车行驶控制。

2 底盘混合驱动系统设计

2.1 伺服电机驱动系统

伺服电机驱动系统采用增程器为其供能,结构方案如图 3 所示,电驱动系统由左右对称布置的减速器、双电机、蓄电池组及增程器组成,增程器可持续给蓄电池组充电,必要时蓄电池组也可外接充电。

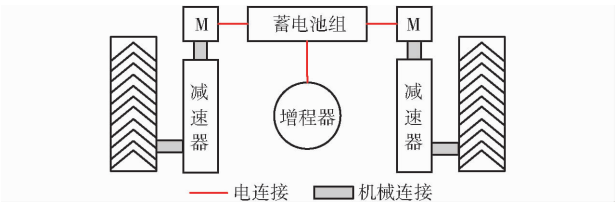


图 3 电驱动系统结构方案

Fig. 3 Design scheme of electric drive system

液压驱动系统与电驱动力系统由 PLC 综合控制,图 4 为混动底盘电驱动系统组成,PLC 在接收遥控器指令后,经闭环运算后向电机驱动器发出控制指令,驱动伺服电机转动。在电机与减速器之间装有转矩转速传感器,可实时检测电机输出扭矩、转速与功率,转矩转速传感器输出端连接减速器,高速电机经减速器后进行低速大扭矩输出。

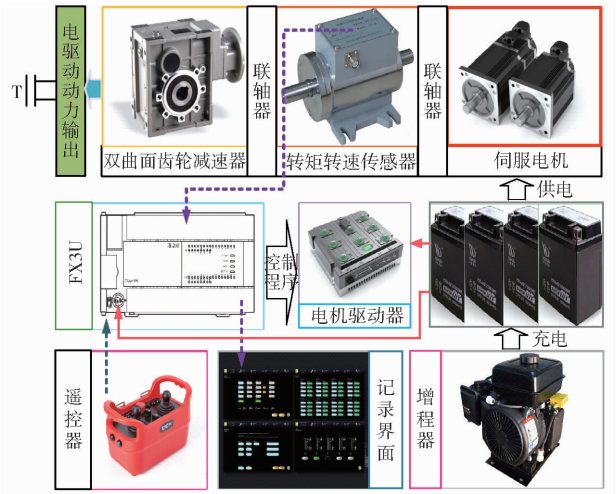


图 4 混合动力底盘电驱动系统组成

Fig. 4 Structural composition of electric drive system of hybrid chassis

2.2 闭式回路液压驱动系统

液电混动履带底盘采用闭式容积调速回路,具有效率高、发热少等优点。图 5 为液压驱动系统组成,主要包括遥控器、柴油机、液压泵、液压马达、控制器、传感器以及数据采集模块等。柴油机驱动双联泵工作,PLC 接收遥控器动作指令后发出控制信号,经放大电路调制后驱动双联泵内置电磁阀工作,电磁阀根据控制信号比例调节泵内变量机构,改变

泵斜盘倾角，从而实现液压泵流量的线性比例控制，驱动液压马达完成前进、后退、加速等行驶指令。电池组为整个工作系统供电，液压泵出口装有液压和流量传感器，输出信号可由液压万用表采集，相应数据用于检测液压回路输出的转矩和转速。

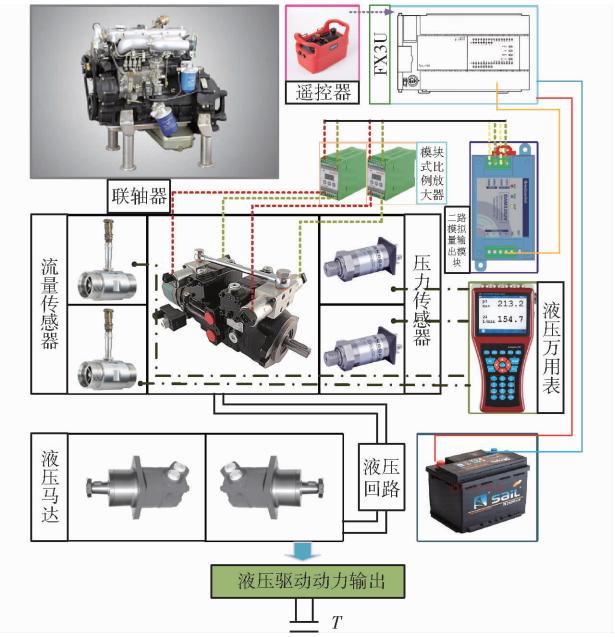


图 5　混合动力底盘闭式液压驱动系统组成

Fig. 5　Structural composition of hybrid chassis closed hydraulic drive system

液压驱动系统为变量泵-定量马达的泵控容积调速回路。在调速过程中，变量泵、马达流量、压力、转矩满足

$$n_m = \frac{q_p}{V_m} = \frac{n_p V_p}{V_m} \tag{1}$$

$$T_m = \frac{\Delta p q_m}{\omega_m} = \frac{\Delta p V_m}{2\pi} \tag{2}$$

$$P_m = \Delta p V_m n_m = \Delta p V_p n_p \tag{3}$$

式中　n_m——液压马达输出转速，r/s

q_p——液压泵流量，m^3/s

V_m——液压马达排量，m^3/r

n_p——液压泵输出转速，r/s

V_p——液压泵排量，m^3/r

q_m——液压马达流量，mL/min

ω_m——液压马达角速度，rad/s

T_m——马达输出扭矩，N·m

Δp——液压马达进出口压差，MPa

P_m——马达输出功率，kW

随着液压马达输出功率的增大，在外负载不变时，马达输出扭矩为定值，而马达转速随排量的增大正比例增加，为达到目标输出转速，只需调节变量泵的排量即可实现对底盘的行驶控制。

2.3　液压马达与伺服电机混动系统

2.3.1　总体控制策略

通过计算可获得履带底盘在行驶过程中需求功率 P，由功率表获取电池状态 C，再结合电池、电机及柴油机各自输出特性，选择最佳工作模式，以确保履带底盘高效运行，整体控制策略如图 6 所示。

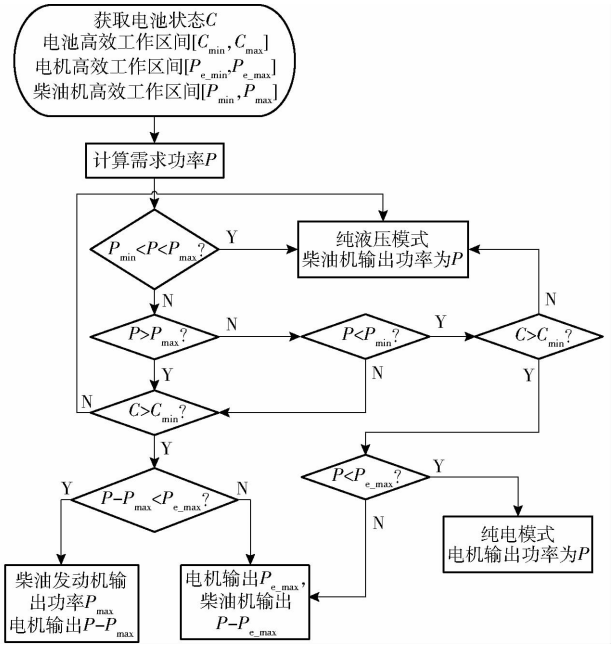


图 6　整体控制策略图

Fig. 6　Overall control strategy diagram

对于混动模式，柴油机和电机需要同时工作，同侧液压马达和电机连接在同一履带上，因此在保证左右两侧履带速度一致的同时，还需进行同侧履带电机与液压马达的速度匹配，才能使得整机正常行驶。电机响应速度远快于液压马达，因而采用电机调速匹配液压马达转速的调配方法，进行速度耦合。

2.3.2　电机和液压马达速度匹配控制

液电混动履带底盘行驶过程中功率为 P，整车动力由前驱动轮和后驱动轮提供，整车所需要转矩为 T_s，前驱动轮与液压马达相连，所提供转矩为 T_m，张紧驱动轮与减速器和驱动电机相连，所提供转矩为 T_n，即 $T_s = T_m + T_n$，其中液压马达承担大部分转矩，电机承担剩余转矩。

定量马达与伺服电机由履带连接，速度具有同步性，存在 $n_m = Kn_b$ 的关系，其中 n_b 为减速器输出轴转速，K 为比例系数。在履带所受负载一定时，由于液压马达的驱动力较大，电机响应速度较快，所以履带转速将由定量马达转速决定，而电机转速则动态匹配马达速度，左右履带偏差耦合控制主要针对两侧马达进行速度控制，同侧马达与电机则采用主从同步控制，以定量马达输出转速为目标转速，调节电机转速进行同步。

图 7 为液压马达-电机速度耦合控制原理，给定目标转速（履带底盘左右履带实际期望转速），通过定量马达与电机传动比可计算得到左右电机需求转速，左右马达转速偏差可通过速度补偿器进行补偿，定量马达转速除以其与电机传动比即可得到电机目标转速，通过控制器对左右电机输出转速进行动态调整，使电机转速可以快速与目标转速实现同步。

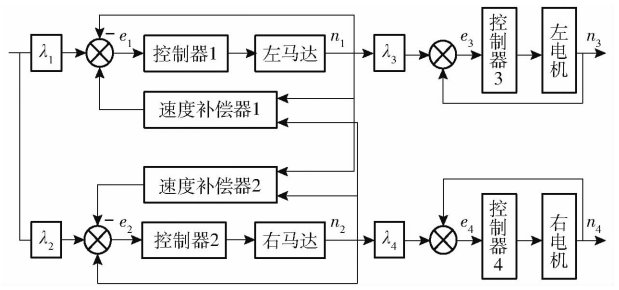


图 7 马达-电机速度耦合控制原理图

Fig. 7 Hydraulic motor - motor control schematic

液压马达角速度 ω 对阀芯位移 X_m 的传递函数为

$$\frac{\omega}{X_m}=\frac{K_q/D_n}{\frac{s^2}{\omega_b^2}+\frac{2\delta_h s}{\omega_b}+1} \tag{4}$$

式中 D_n——液压马达理论排量，取 $1.591\,5\times10^{8}$ m^3/r

K_q——伺服阀流量增益系数，取 5 m^2/s

δ_h——油液有效体积弹性模量，取 7×10^{8} Pa

ω_b——固有频率

液压马达角速度 ω 对外负载 T 的传递函数为

$$\frac{\omega}{T}=\frac{-K_h\left(1+\frac{V_t s}{4\beta_i K_h}\right)}{\frac{s^2}{\omega_b^2}+\frac{2\delta_h s}{\omega_b}+1} \tag{5}$$

式中 K_h——总流量压力系数，取 8.11×10^{-11} m^5/(N·s)

V_t——总压缩容积，m^3

β_i——有效体积弹性模量，Pa

通过式（4）、（5）建立马达-电机速度耦合 Simulink 模型，如图 8 所示。其中，输入目标转速为 80 r/min，经过增益模块传递给液压马达，根据液压马达转速对外负载的传递函数进行转换，最后输出马达实际转速，反馈回输入进行负反馈调节，并同时输入到直流电机模型（图 9）控制电机转速。根据左右马达转速差，对左右马达输入转速进行动态补偿；同侧液压马达和电机，则采用主从同步控制，对电机

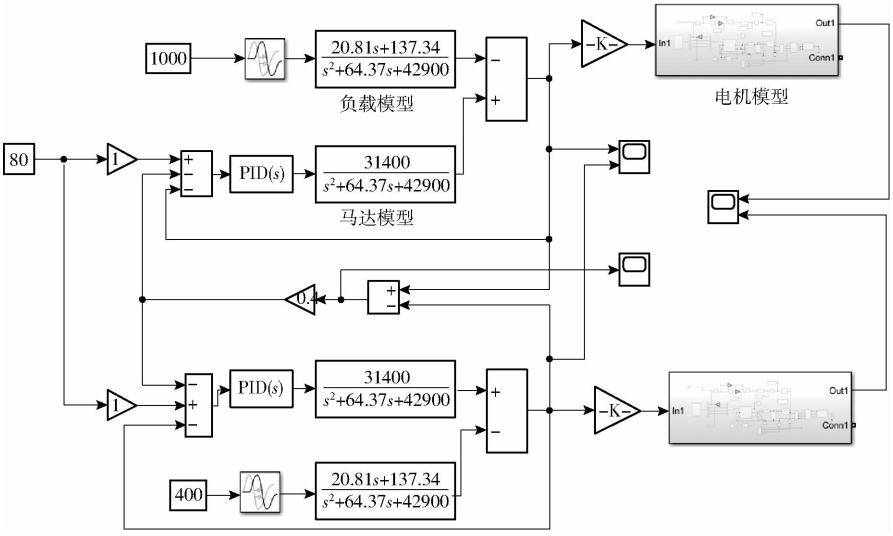


图 8 马达-电机速度耦合 Simulink 模型

Fig. 8 Simulink model of hydraulic motor - motor coupling

转速进行同步调节。

图 10 为马达转速变化曲线，左右马达输入目标转速均为 80 r/min。其中，左马达负载扭矩设置为 1 000 N·m，右马达负载扭矩设置为 400 N·m，左右马达输出转速曲线基本重合，同步性能良好。

3 液电混动系统机液联合仿真

根据液电混动系统工作原理，在 AMEsim 中建立底盘行走液压驱动系统与伺服电机驱动系统的耦合仿真模型，与 Matlab/Simulink 模型进行机液联合仿真，对履带底盘在不同工况下变量泵、液压马达及伺服电机动态特性进行对比分析。

3.1 液电混动系统联合仿真模型

联合仿真模型如图 11 所示，主要包含信号源、机械元件、液压元件和联合仿真接口模块。通过外部信号输入给定目标转速，输出电信号控制变量泵斜盘倾角，同时利用转速传感器采集马达实际转速，并输出到 Matlab/Simulink 控制器中。基于马达目标转速与实际转速之差，通过控制算法对其进行修正。在马达与电机同步控制方面，采用主从同步的控制方式，将马达转速同步输入到电机控制器中，作为电机目标转速进行实时控制，仿真主要元件参数

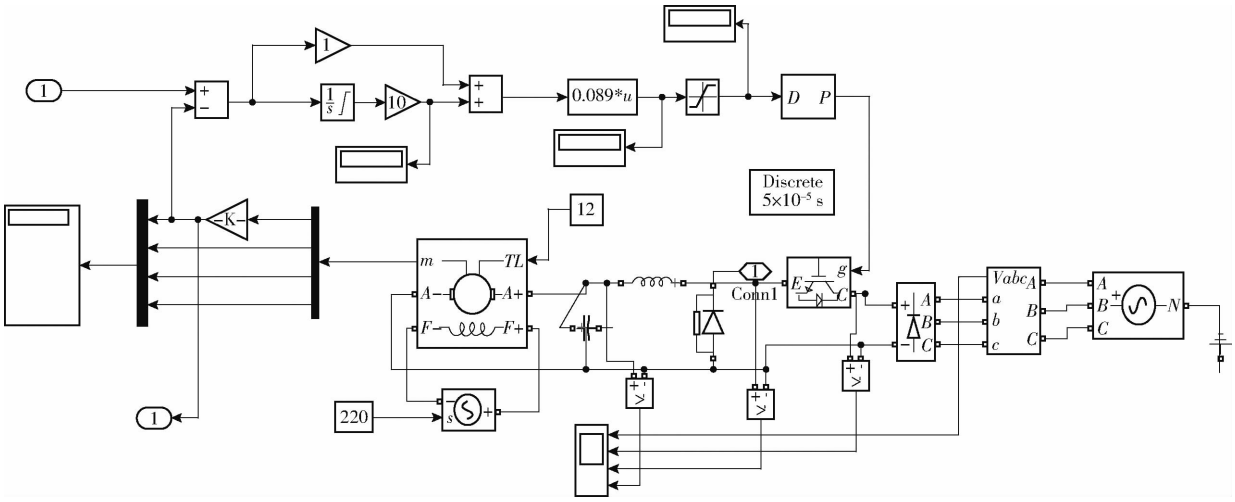


图 9　电机 Simulink 模型

Fig. 9　Simulink model of motor

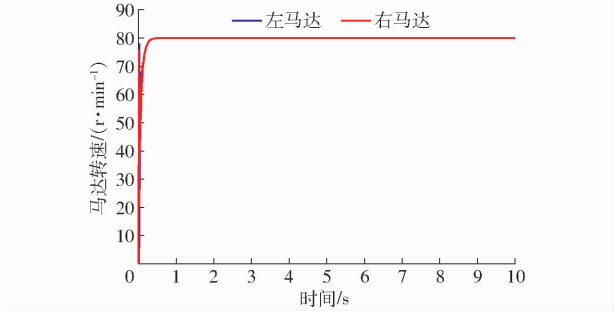


图 10　马达转速变化曲线

Fig. 10　Motor speed change curves

设置如表 2 所示。

3.2　液电混动底盘行驶动态性能仿真

3.2.1　平地道路仿真

将平地道路负载扭矩模型输入到机液联合仿真模型中，得到液压马达流量变化曲线如图 12 所示，整机在 0 s 时启动，在 1 s 时达到匀速工作状态，流量迅速上升。稳定在 14.5 L/min 左右上下波动，且波动幅度较小，左右马达流量变化趋势基本相同，马达同步性能良好。

图 13 为马达压力变化曲线，图 14 为电机转速变化曲线，图 15 为平地履带速度变化曲线，履带轮存在小角度摆幅振动，履带与地面接触面积及受力发生变化，驱动轮扭矩随之发生变化，马达压力会产生一定波动，最大压力约为 20.6 MPa，最小压力约为 16.5 MPa，左右两侧马达压力分布主要集中在 17.5 MPa 左右。

在平地道路工况下，电机转速变化较为平稳，基本稳定在 470 r/min 左右，电机转速从 0 时刻开始，经过 6 s 后达到转速 473 r/min，此时左侧履带速度为 0.346 m/s，右电机转速经过 8.9 s 后达到转速 471.5 r/min，此时右侧履带速度为 0.345 m/s，行驶加速度为 0.057 m/s^2，之后履带底盘开始匀速运动。电机经减速器减速后，与液压马达共同驱动履带底盘运动。由于履带约束作用，电机转速变化与同侧液压马达流量变化基本相似，左右侧履带速度最大差值为 0.006 m/s，最大同步误差为 1.7%，同步性能良好。履带底盘在硬土地上行驶时供油量稳定，混合动力系统行驶性能良好。

3.2.2　坡面道路测试

在丘陵山地，路面崎岖不平，作业环境往往具有一定坡度，为在丘陵山地顺利开展作业，底盘应具有良好的爬坡能力。建立履带底盘在 25°斜坡上行驶时的负载扭矩模型，输入到机液联合仿真模型中，进行坡面道路仿真。

图 16 为马达流量变化曲线，图 17 为马达压力变化曲线，图 18 为电机转速变化曲线，图 19 为坡面履带速度变化曲线。从图 16 ~ 19 可以看出，履带底盘在进行爬坡时，流量会迅速上升，左右履带速度也会迅速增大，左侧履带速度经 5.3 s 上升为 0.337 m/s，右侧履带速度经过 6.9 s 上升为 0.335 m/s，履带底盘最大加速度为 0.063 m/s^2，随后进入匀速工作状态，流量保持在 14 L/min 左右。

由图 16 可知，在 53 s 时，受道路负载影响，液压马达流量会迅速下降，降至 12.1 L/min，电机转速也会跟随下降，从 456 r/min 降为 392 r/min，过约 2 s 后马达流量和电机转速重新恢复稳定。到 78 s 时，由于负载扰动，马达流量从 13.8 L/min 降至 11.9 L/min，电机转速从 455 r/min 降至 392 r/min，经过一段时间后再次恢复到稳定状态，液压马达最大压力为 22.1 MPa，最小压力为 14.8 MPa，压力波动区间为 17 ~ 20 MPa 之间。

当履带底盘遇到负载扰动时，系统压力、流量和转速都会产生相应的变化，但在混动系统调节作用下，整机会迅速适应负载扰动，压力流量波动会逐渐

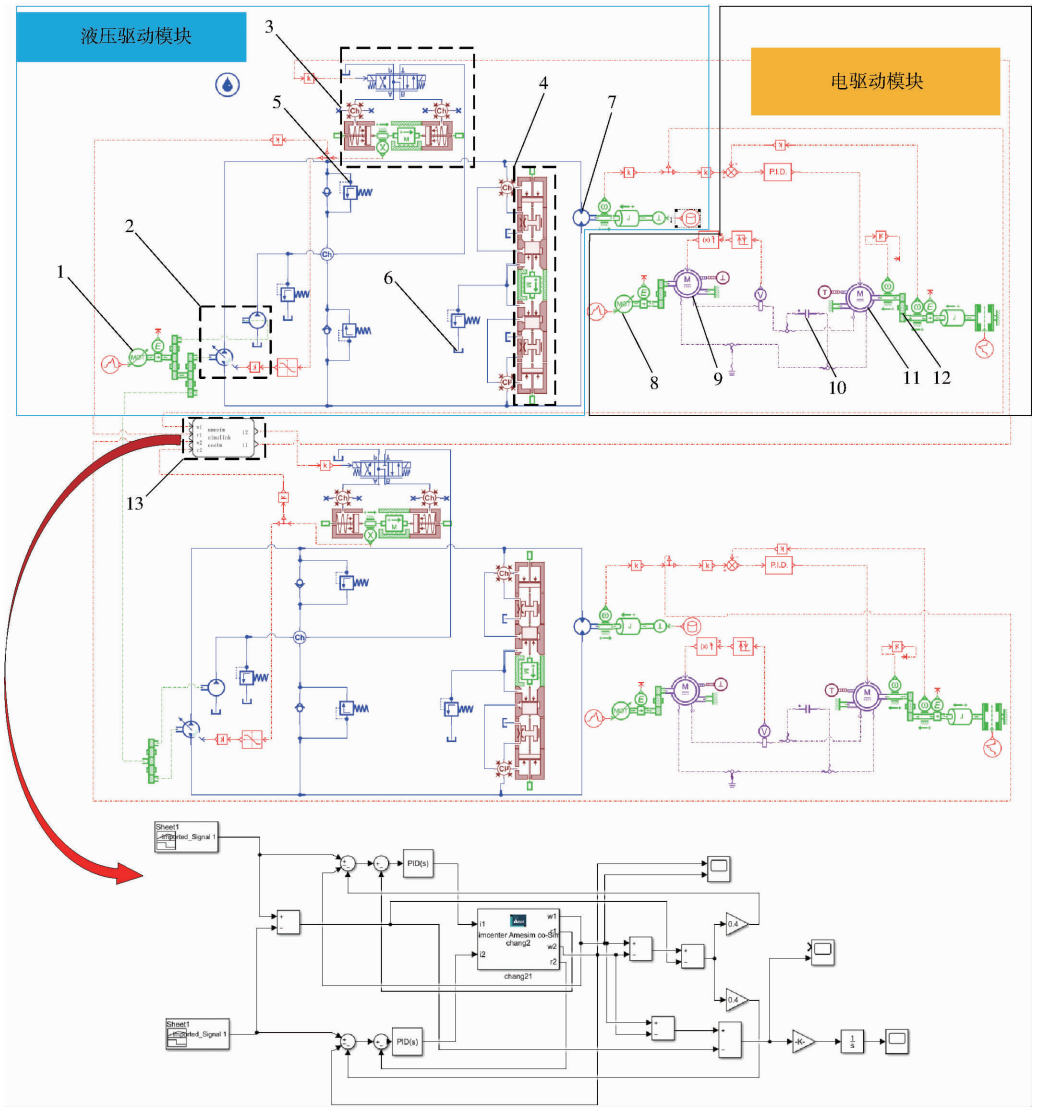


图 11 AMEsim－Simulink 机液联合仿真模型

Fig. 11 AMEsim－Simulink co-simulation model

1. 柴油机 2. 变量泵输出模块 3. 变量泵控制模块 4. 冲洗阀 5. 安全阀 6. 油缸 7. 液压马达 8. 增程器 9. 发电机 10. 电池 11. 电机 12. 减速器 13. Simulink 控制器

表 2 主要元件参数设置

Tab. 2 Main component parameter settings

元件	参数	数值
马达	排量/(mL·r^{-1})	490
	额定转速/(r·min^{-1})	100
电机	额定效率	0.9
	额定转矩/(N·m)	12.7
	额定功率/W	2 000
	额定转速/(r·min^{-1})	1 500
	时间常数	0.1
减速器	传动比	15
安全阀	开启压力/MPa	20
	流量压力梯度	500

减小稳定下来。在此调节过程中,两侧履带最大速度差约为 0.024 m/s,最大同步误差约为 7.1%,混合动力系统可较好适应负载扰动的影响。

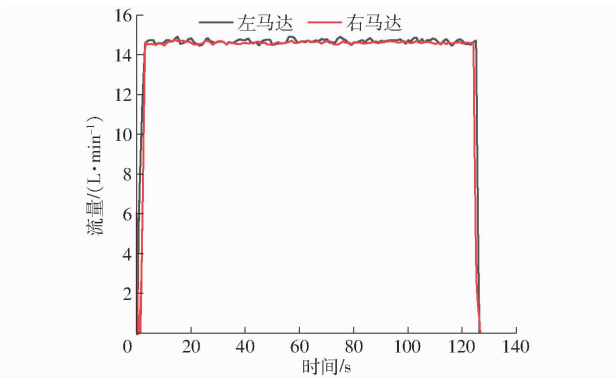


图 12 平地液压马达流量变化曲线

Fig. 12 Variation curves of flat ground hydraulic motor flow

4 液电混动底盘样机试验

4.1 直线行驶偏移量试验

跑偏量试验是检验液电混动履带底盘直线行走

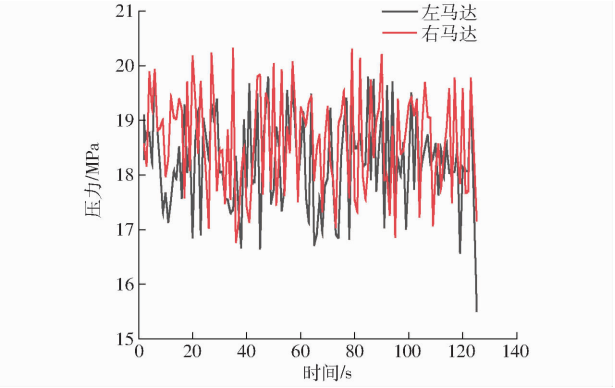


图 13　平地液压马达压力变化曲线

Fig. 13　Pressure change curves of flat ground hydraulic motor

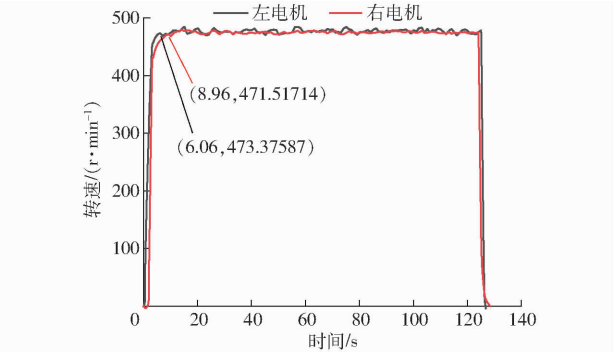


图 14　平地电机转速变化曲线

Fig. 14　Speed change curves of flat motor

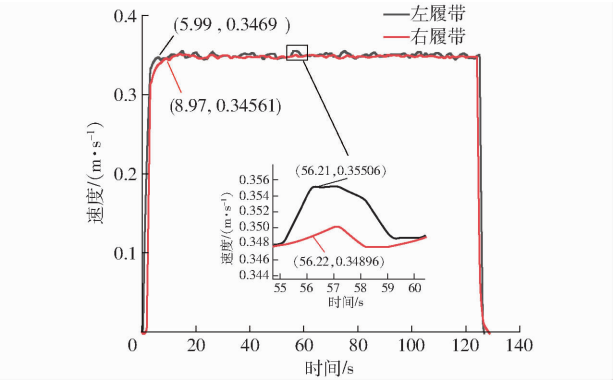


图 15　平地履带速度变化曲线

Fig. 15　Track speed change curves on flat ground

质量的重要标准。试验时主要测量底盘在行驶中偏移基准的距离，试验原理如图 20 所示，样机进行 100 m 直线行驶偏移量测试。

偏移量和偏移率计算式为

$$\Delta b = b_0 - b_1 \tag{6}$$

$$h = \frac{b_0 - b_1}{L} \times 100\% \tag{7}$$

式中　b_0——初始最外侧履带距离标识线宽度，m

b_1——行驶结束时最外侧履带距离标识线的宽度，m

L——履带底盘行驶距离，m

Δb——直线行驶偏移量，m

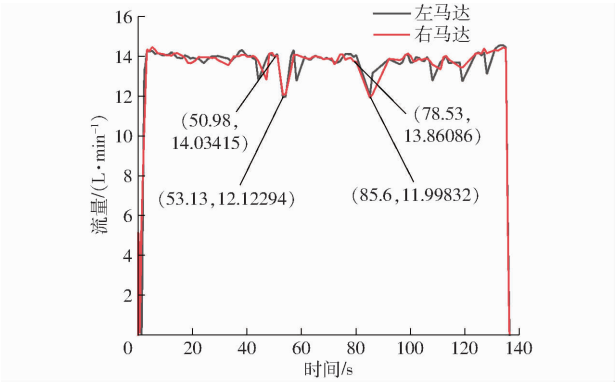


图 16　坡面马达流量变化曲线

Fig. 16　Variation curves of slope motor flow

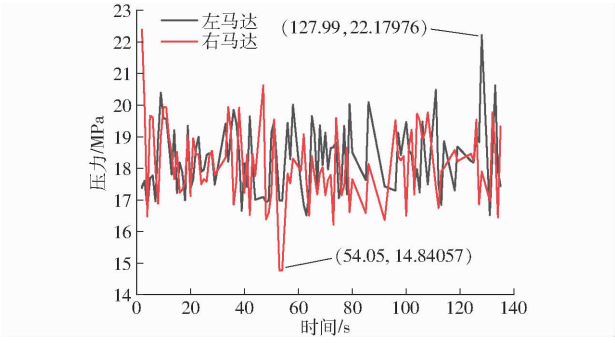


图 17　坡面马达压力变化曲线

Fig. 17　Pressure change curves of slope motor

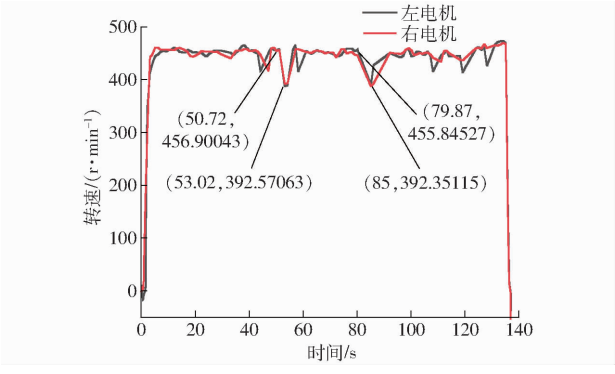


图 18　坡面电机转速变化曲线

Fig. 18　Curves of speed change of slope motor

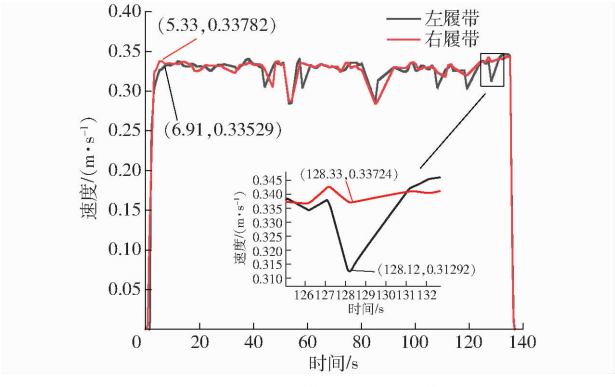
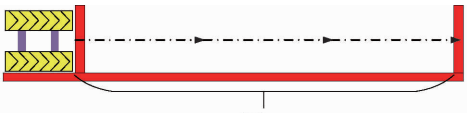


图 19　坡面履带速度变化曲线

Fig. 19　Curves of track speed change on slope

h——直线行驶偏移率，%

偏移量和偏移率测量结果如表 3 所示，样机直



(a) 跑偏量测试原理



(b) 现场试验

图 20 直线行驶偏移量试验

Fig. 20 Offset tests of straight-line driving

表 3 履带底盘跑偏量试验结果

Tab. 3 Test results of track chassis deviation

驱动模式	行驶距离/m	偏移量/m	偏移率/%
液压驱动	10	0.30	3.0
	30	0.36	1.2
	45	1.50	3.3
混合驱动	12	0.24	2.0
	32	0.23	0.9
	40	0.64	1.6

线行驶偏移率不大于 3.3%，相比于纯液压驱动，液电混动模式下履带前后均受到驱动力矩，具有更好的路面适应能力，行驶偏移量更小，稳定性更好。

4.2 转向性能测试

样机最小转向半径试验时，两条履带一侧向前运动，一侧向后运动，样机在原地进行转向，待样机旋转 360°后驶离测试区域，利用卷尺测量样机履带在地面留下的碾压轨迹圆直径，即可得到样机转向半径，如图 21 所示。测得履带底盘原地低速转向时间为 5.0 s，高速转弯时间为 2.4 s，最小转弯直径为 150 cm，转向性能良好。



图 21 原地转向试验

Fig. 21 In situ steering test

4.3 不同工况行驶特性试验

为了实时检测底盘动态性能，在液压泵、柴油发动机以及左右两侧电机上均安装了传感器，采用串口服务器并行通讯方式采集监测数据，将串口服务器和无线路由器在上位机中进行组态，完成样机底层数据与上位机之间的无线通讯。试验主要测试样机在土地、草地、斜坡等 3 种不同工况下的动态行驶性能。

4.3.1 土地工况

图 22 为硬土地路面工况试验，选长度为 50 m 硬土地路面，测试履带底盘动态行驶性能。



图 22 硬土地路面测试

Fig. 22 Hard soil road test

图 23、24 为马达流量及压力变化曲线。由图 23、24 可知，左马达经过 5 s 流量迅速从 0 上升到 14.4 L/min，右马达流量过 3 s 迅速升至 14.2 L/min，随后基本保持稳定，底盘匀速行驶。马达压力波动范围在 17 ~ 21.6 MPa 之间，均值约为 18 MPa。导致左右马达流量变化不同步的主要原因为：①左右马达受到的负载扭矩不同。②与液压泵相连的比例放大器存在调节控制精度差异。总体上看，左右马达流量变化趋势基本相同，左右马达流量差最大为 0.4 L/min，最小为 0.1 L/min，同步性能满足需求。

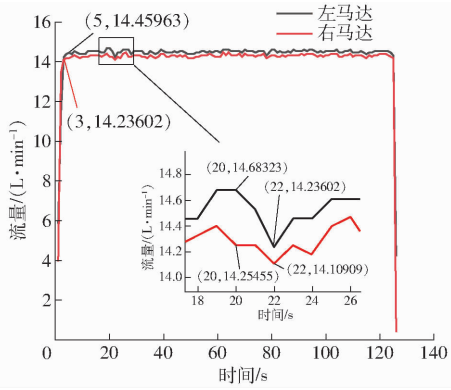


图 23 硬土地马达流量变化曲线

Fig. 23 Variation curves of motor flow in hard soil

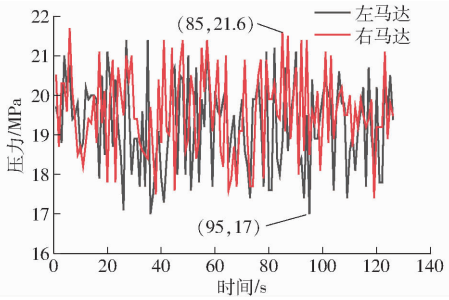


图 24 硬土地马达压力变化曲线

Fig. 24 Variation curves of motor pressure in hard soil

图 25 为电机转速变化曲线，图 26 为速度变化曲线，在马达流量升到稳定状态时，左右电机转速也迅速跟随升高，经 6 s 时左电机转速升至 474.1 r/min，左侧履带速度为 0.347 m/s，经 4 s 时右电机转速上升为 475.1 r/min，右侧履带速度为 0.348 m/s，与上述马达流量变化基本保持一致，表明电机与马达转速能较好匹配。底盘行驶加速度约为 0.087 m/s^2，左右两侧履带最大速度差值为 0.007 m/s，最大同步误差为 2.0%，底盘左右履带同步性能较好。

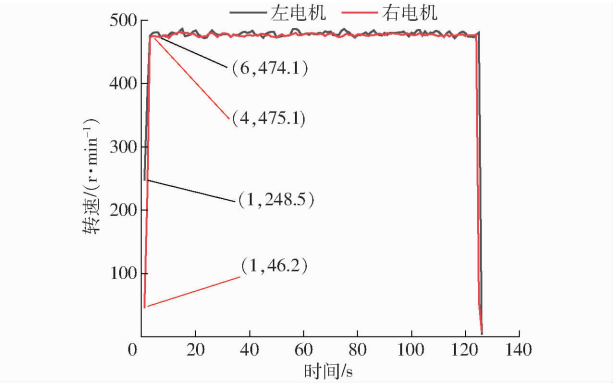


图 25　硬土地电机转速变化曲线

Fig. 25　Change curves of motor speed

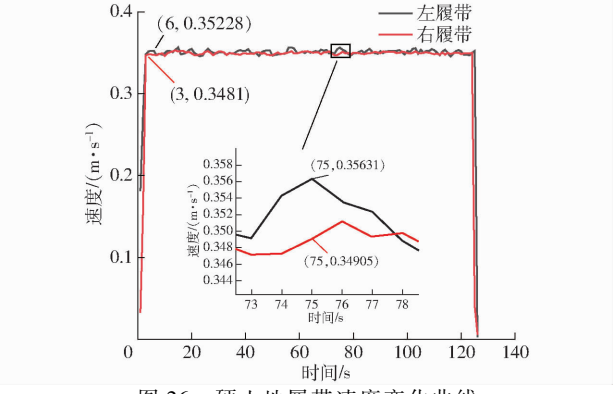


图 26　硬土地履带速度变化曲线

Fig. 26　Curves of track speed change

4.3.2　草地工况

取长度为 50 m 的草地路面，测试履带底盘在草地路面的动态行驶性能，如图 27 所示。



图 27　草地路面测试

Fig. 27　Grass road test

图 28 为草地工况马达流量变化曲线，与硬土地工况相比，在草地工况下液压马达流量波动更加剧烈，左右马达流量变化趋势基本相似，左右马达同步性能未受影响。在 75 s 时，履带底盘由于受到草地地形及石块影响，左马达流量从 14.2 L/min 降低为 12.2 L/min，右马达流量从 14.6 L/min 降低为 10.6 L/min。图 29 为马达压力变化曲线，右马达在 75 ~ 77 s 之间压力迅速增大，77 s 时右马达压力为 20.6 MPa，达到马达压力峰值。图 30 为电机转速变化曲线，图 31 为速度变化曲线。由图 30、31 可知，经 3 s 履带速度可上升到 0.332 m/s，底盘加速度约为 0.110 m/s^2。当马达流量下降时，电机转速也随之减小，验证了底盘在草地路面行驶时液压马达与电机依然具有良好的同步性。

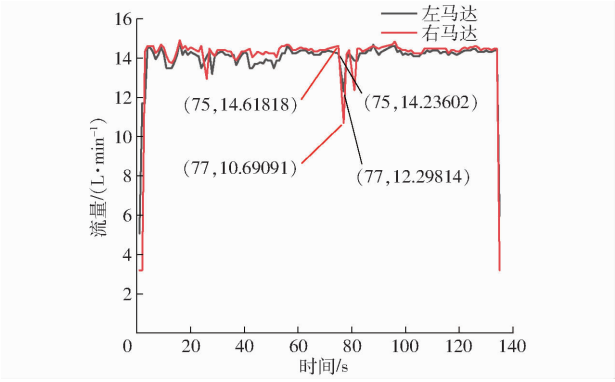


图 28　草地工况马达流量变化曲线

Fig. 28　Variation curves of motor flow in grassland

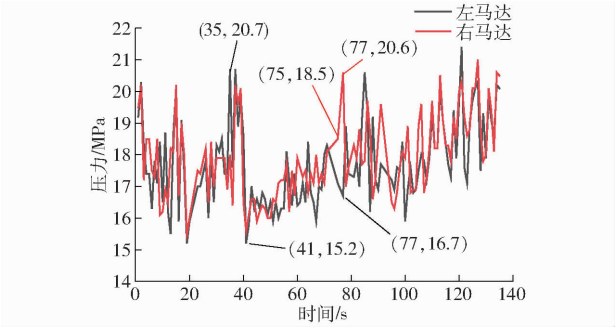


图 29　草地马达压力变化曲线

Fig. 29　Variation curves of motor pressure in grassland

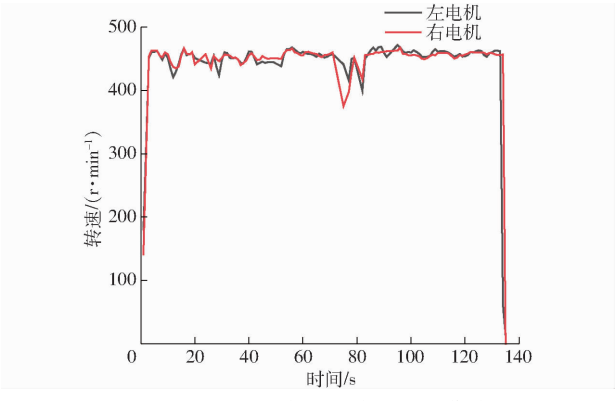


图 30　草地行驶电机转速变化曲线

Fig. 30　Grass driving motor speed change curves

4.3.3　斜坡工况

选取长度为 50 m、坡度为 25°的斜坡进行斜坡

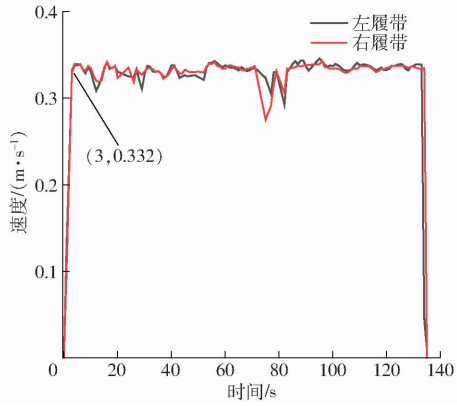


图 31 草地行驶速度变化曲线

Fig. 31 Grassland driving speed change curves

工况行驶性能测试,斜坡路段上存在大小不一的坑洼,能较好地考核履带底盘的爬坡及越障性能,如图 32 所示。



图 32 斜坡道路测试

Fig. 32 Slope road test

图 33 为马达流量变化曲线,在 0 ~ 51 s 时段内,液压马达流量较为稳定,在 51 s 时,底盘陷入坑洼地形中,负载瞬间变大,液压马达流量迅速减小,经过 4 s 左马达流量从 14.1 L/min 降为 9.6 L/min,右马达流量从 14.1 L/min 降为 10.2 L/min。图 34 为马达压力变化曲线,相比于土地和草地,履带底盘在斜坡上行驶时负载更大,液压马达压力会更高。在行驶过程中,液压马达最小压力为 15.8 MPa,最大压力为 21.8 MPa,均值约为 19.5 MPa,液压马达行驶压力高于土地及草地工况行驶压力。

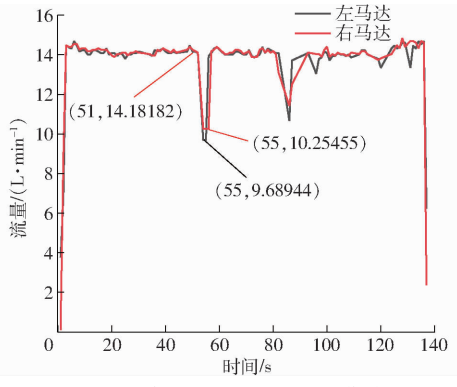


图 33 斜坡马达流量变化曲线

Fig. 33 Flow curves of motor in sloping fields

图 35 为电机转速变化曲线,可以看到电机转速也在此期间迅速减小,在越过坑洼后,液压马达流量和电机转速又恢复正常稳定状态。在行驶过程中遇到较大的负载变化时,电机转速能迅速匹配液压马达速度的变化,液电混动系统抗干扰能力较好。

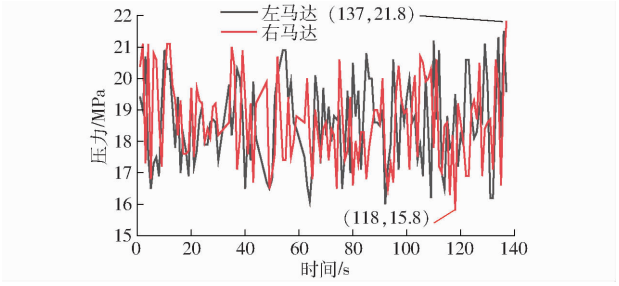


图 34 斜坡马达压力变化曲线

Fig. 34 Pressure change curves of motor in sloping fields

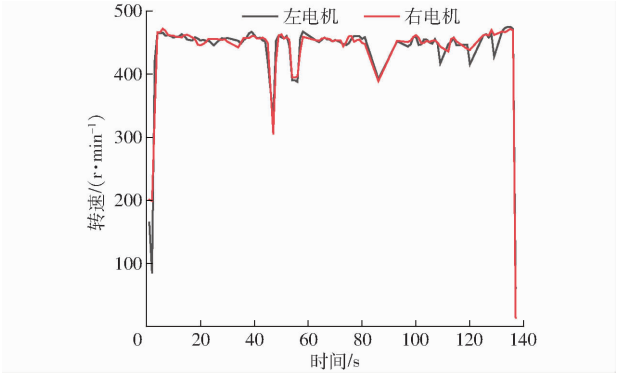


图 35 斜坡电机转速变化曲线

Fig. 35 Speed change curves of motor in sloping fields

图 36 为斜坡工况履带速度变化曲线,在爬坡过程中底盘经 4 s 速度上升为 0.340 m/s,加速度为 0.085 m/s^2,两侧履带速度最大差值为 0.023 m/s,最大同步误差为 7.3%,同步性能较好。试验测试坡度约为 25°,履带底盘能够顺利越过试验斜坡,表明具有良好爬坡越障性能,能较好适应丘陵山区复杂地形。

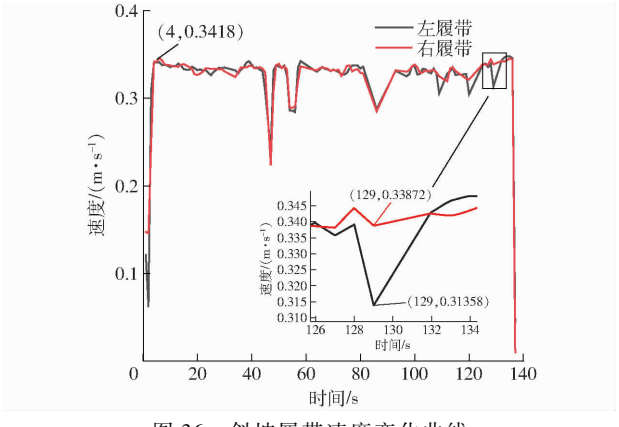


图 36 斜坡履带速度变化曲线

Fig. 36 Change curves of track speed in sloping fields

4.4 行驶能耗对比

选取长度为 50 m 的硬土地测试道路,在混动模

式和液压模式下分别将柴油发动机油门调到最大，得到速度曲线如图 37 所示，测得履带底盘最大行驶速度为 1.105 m/s，最大加速度为 0.36 m/s^2，2 种不同驱动模式性能对比如表 4 所示。

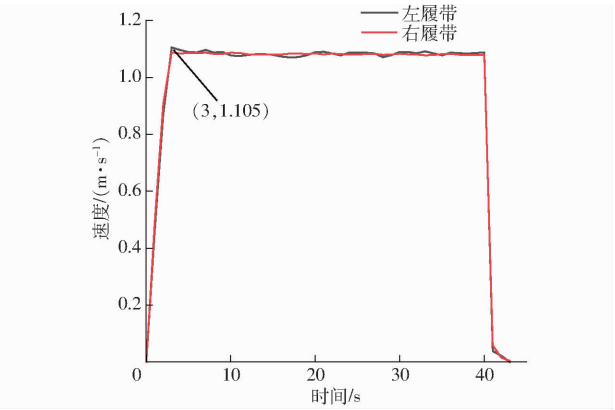


图 37　最大履带速度测试曲线

Fig. 37　Maximum track speed test curves

表 4　混动履带底盘性能提升对比

Tab. 4　Comparison of performance improvement of hybrid track chassis

模式	续航里程/m	最大输出扭矩/(N·m)	最大加速度/(m·s^{-2})	能耗/(kW·h)
液压模式	8 026	1 095	0.320	0.374
混动模式	10 317	1 200	0.360	0.339
提升比重/%	28.5	9.5	12.5	9.3

进行液压驱动与电液混合驱动能耗对比时，需要保证底盘在此 2 种驱动模式下整机总功率相近。通过适当减小混动模式下柴油机功率来匹配液压驱动模式下整机功率，最终可获得混动模式下整机总功率为 30.5 kW 时液压马达功率曲线（此时对应的液压驱动模式整机功率为 31.0 kW，两种模式总功率基本相近）。图 38 为总功率为 31.2 kW 纯液压模式下马达功率曲线，履带底盘总功率约为 31.2 kW，通过 50 m 硬土地路面的时间为 43.2 s，计算得到消耗的能量为 0.374 kW·h。图 39 为总功率为 30.5 kW 混动模式下马达功率曲线，左液压马达功率约为 13.3 kW，右马达功率约为 13.2 kW，液压马达总功率约为 26.5 kW，考虑 2 个电机输出功率为 4.0 kW，则混动模式下输出总功率为 30.5 kW，通过 50 m 硬土地路面的时间为 40.1 s，计算得到消耗能量为 0.339 kW·h，相比纯液压驱动模式能耗降低 9.3%。

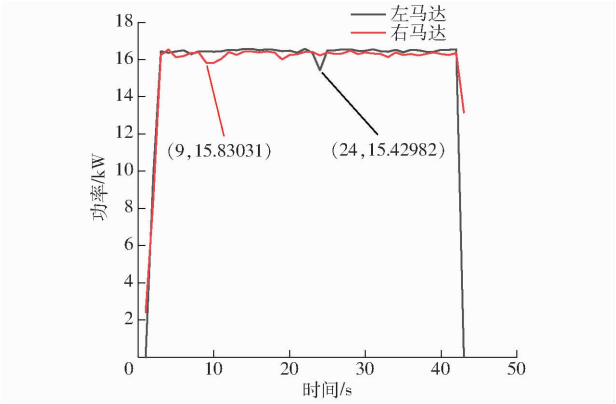


图 38　总功率为 31.2 kW 液压模式下功率变化曲线

Fig. 38　Power change curves of hydraulic mode with a total power of 31.2 kW

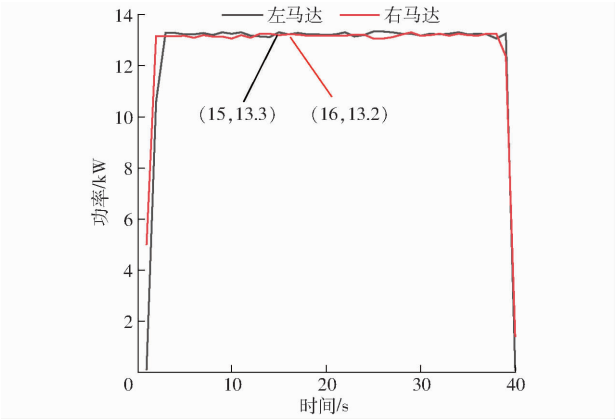


图 39　总功率为 30.5 kW 混动模式下功率变化曲线

Fig. 39　Power change curves of hybrid mode with a total power of 30.5 kW

5　结论

（1）基于 AMEsim 和 Matlab/Simulink 进行了电液驱动系统的联合仿真，深入研究了液电混动履带底盘在不同工况下系统动态特性。结果表明，在平地和斜坡上履带底盘压力波动均在 17 ~ 20 MPa 之间，在平地上最大同步误差为 1.7%，履带底盘具有良好的稳定性和同步性。

（2）进行了硬土地、草地、斜坡、转弯及跑偏量的样机试验，履带底盘行驶的偏移率不大于 3.3%，最小转弯直径为 150 cm，最大行驶速度为 1.10 m/s，最大加速度为 0.36 m/s^2，液电混动履带底盘在不同环境下均具有良好的性能，可适应不同地况，运行稳定，满足设计要求。

（3）与传统液压履带底盘相比，液电混合动力履带底盘行驶能耗可减少 9.3%，有效降低了能量损失。

参　考　文　献

[1]　熊左桥. 履带式拖拉机底盘控制系统的设计及优化[J]. 农机化研究，2023，45(12)：259 - 264.
XIONG Zuoqiao. Design and optimization of chassis control system of crawler tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2023，45(12)：259 - 264.（in Chinese）

[2]　袁博，陈淑花，魏巍. 基于步进电机驱动的精量蔬菜播种机研制[J]. 农机化研究，2022，44(7)：76 - 81，87.

YUAN Bo, CHEN Shuhua, WEI Wei. Development of precision vegetable planter driven by stepping motor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(7): 76 – 81, 87. (in Chinese)

[3] 孙贻新. 四点升降履带式底盘车体自动平衡系统设计与试验[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
SUN Yixin. Design and test of automatic leveling system for multi-point lifting crawler chassis[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[4] 钱寅. 高地隙油茶果收获机底盘设计与虚拟样机试验[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
QIAN Yin. Chassis design and virtual prototype test of *Camellia oleifera* fruit harvester with high clearance[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021. (in Chinese)

[5] 梁炳祥. 自走式履带联合收割机全液压驱动底盘设计方案[J]. 现代农业装备, 2004,25(8): 54 – 55.
LIANG Bingxiang. Design of full hydraulic drive chassis for self-propelled crawler combine harvester[J]. Modern Agricultural Equipment, 2004,25(8): 54 – 55. (in Chinese)

[6] 殷楚晴. 丘陵山区履带式电动底盘的研制[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
YIN Chuqing. Development of crawler electric chassis in hilly and mountainous areas[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[7] 高杉, 张雅秋, 秦宇轩, 等. 电驱动履带底盘的设计与应用[J]. 地质装备, 2023, 24(3): 1 – 4.
GAO Shan, ZHANG Yaqiu, QIN Yuxuan, et al. Design and application of electric drive crawler chassis[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2023, 24(3): 1 – 4. (in Chinese)

[8] 印祥, 禹泽栋, 俞康, 等. 农业通用履带底盘控制系统研制[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(12): 73 – 77.
YIN Xiang, YU Zedong, YU Kang, et al. Development of a control system for a general-purpose crawler-type chassis in agriculture[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(12): 73 – 77. (in Chinese)

[9] 赵智宇, 朱立成, 周利明, 等. 丘陵果园除草机器人底盘系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 48 – 57.
ZHAO Zhiyu, ZHU Licheng, ZHOU Liming, et al. Design and experiment of chassis control system for weeding robot in hilly orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 48 – 57. (in Chinese)

[10] 魏忠彩, 王兴欢, 李学强, 等. 履带自走式分拣型马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 95 – 106.
WEI Zhongcai, WANG Xinghuan, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of crawler self-propelled sorting type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(2):95 – 106. (in Chinese)

[11] 刘风顺. 履带自走式马铃薯收获机的底盘优化[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
LIU Fengshun. Chassis optimization of crawler self-propelled potato harvester[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[12] 王德成, 赵彦瑞, 尤泳, 等. 履带自走式缓坡地王草收获机底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 178 – 187.
WANG Decheng, ZHAO Yanrui, YOU Yong, et al. Design and experiment of self-propelled tracked chassis of king grass harvester for gentle sloping fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 178 – 187. (in Chinese)

[13] 周汉林, 刘华, 陈中武, 等. 丘陵山地履带式多功能底盘的设计[J]. 现代农业装备, 2021, 42(5): 56 – 59.
ZHOU Hanlin, LIU Hua, CHEN Zhongwu, et al. Development of tracked multifunctional chassis in hilly and mountainous regions[J]. Modern Agricultural Equipment, 2021, 42(5): 56 – 59. (in Chinese)

[14] 郭凯文. 轻型农用履带底盘通过性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
GUO Kaiwen. Research on mobility of light-agricultural track chassis[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[15] 彭姣春. 履刺高度可调式农用履带底盘设计与试验[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018.
PENG Jiaochun. Design and experiment on agricultural tracked chassis with height-adjustable grouser[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[16] YANG L, BIAO M A, HE-YAN L I. Study on steering control strategy for high-speed tracked vehicle with hydrostatic drive [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 19(2): 158 – 164.

[17] ZHANG H L, LI C S, LI H Y, et al. Synchronization control of high speed tracked vehicle with hydrostatic drive[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 220 – 223: 1679 – 1685.

[18] 滕飞, 吕建刚, 李彦路, 等. 基于效率优化的履带车辆再生制动控制策略[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 11 – 15.
TENG Fei, LÜ Jian'gang G, LI Yanlu, et al. Control strategy for regenerative braking of tracked vehicle based on efficiency optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 11 – 15. (in Chinese)

[19] 曹付义, 周志立, 徐立友. 双流传动履带车辆方向盘操纵系统设计及仿真[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 16 – 19.
CAO Fuyi, ZHOU Zhili, XU Liyou. Design and simulation of steering wheel control system of tracked vehicle of double flow transmission[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2011, 32(3): 16 – 19. (in Chinese)

[20] DU G D, ZOU Y, ZHANG X D, et al. Intelligent energy management for hybrid electric tracked vehicles using online reinforcement learning[J]. Applied Energy, 2019, 251: 1 – 16.

(下转第 418 页)

[20] 付泽民,余奇,熊鹏鹏,等.基于改进人工势场法的机械臂路径规划仿真[J].机床与液压,2021,49(17):20 - 24.
FU Zemin, YU Qi, XIONG Pengpeng, et al. Silulation of path planning of manipulator based on improved artificial potential field method[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2021, 49(17): 20 - 24. (in Chinese)

[21] 李龙,陈禾炜,汪田鸿,等.基于接近觉的机械臂避障路径规划[J].机器人,2022,44(5):601 - 612.
LI Long, CHEN Hewei, WANG Tianhong, et al. Obstacle avoidance path planning of manipulator based on proximity[J]. Robot, 2022, 44(5): 601 - 612. (in Chinese)

[22] LIU Lifen, SHI Ruoxin, LI Shuandao, et al. Path planning for UAVS based on improved artificial potential field method through changing the repulsive potential function[C]//2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), 2016: 2011 - 2015.

[23] BOUNINI F, GINGRAS D, POLLART H, et al. Modified artificial potential field method for online path planning applications[C]//2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2017: 180 - 185.

[24] 齐有泉,李艳文,陈子明,等.串联九自由度喷涂机器人及其运动学分析[J].机械工程学报,2020,56(23):165 - 171.
QI Youquan, LI Yanwen, CHEN Ziming, et al. Design and kinematics' analying of a series nine-degree-of-freedom spraying robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(23): 165 - 171. (in Chinese)

[25] 王学雷,张宾,徐松兵,等.五自由度混联机构圆弧插补算法研究[J].农业机械学报,2017,48(12):403 - 411.
WANG Xuelei, ZHANG Bin, XU Songbing, et al. Spatial arc interpolation analysis of novel 5-DOF hybrid mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 403 - 411. (in Chinese)

[26] TIRNOVEAN M S. Researches regarding the circular interpolation algorithms at CNC laser cutting machines[J]. ACTA Universitatis Cibiniensis, 2015, 67(1): 127 - 132.

[27] 李宪华,盛蕊,张雷刚,等.六自由度模块化机器人手臂奇异构型分析[J].农业机械学报,2017,48(7):376 - 382.
LI Xianhua, SHENG Rui, ZHANG Leigang, et al. Singular configuration analysis of 6-DOF modular manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 376 - 382. (in Chinese)

[28] 贾庆轩,陈钢,孙汉旭,等.基于 A* 算法的空间机械臂避障路径规划[J].机械工程学报,2010,46(13):109 - 115.
JIA Qingxuan, CHEN Gang, SUN Hanxu, et al. Path planning for space manipulator to avoid obstacle based on A* algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 109 - 115. (in Chinese)

(上接第 408 页)

[21] DU G D, ZOU Y, ZHANG X D, et al. Deep reinforcement learning based energy management for a hybrid electric vehicle[J]. Energy, 2020, 201: 1 - 13.

[22] DU G D, ZOU Y, ZHANG X D, et al. Energy management for a hybrid electric vehicle based on prioritized deep reinforcement learning framework[J]. Energy, 2022, 241: 1 - 18.

[23] YUAN Z, TENG L, LIU D, et al. Reinforcement learning-based real-time energy management for a hybrid tracked vehicle[J]. Applied Energy, 2016, 171: 372 - 382.

[24] WEI S, YUAN Z, SUN F, et al. Energy management optimization for a hybrid tracked vehicle using the radius pseudo spectral method[J]. Energy Procedia, 2016, 88: 957 - 963.

[25] 万星宇, 舒彩霞, 廖庆喜, 等. 高地隙履带自走式中间条铺油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 109 - 121.
WAN Xingyu, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of self-propelled middle-placement rape windrower with high ground clearance crawler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 109 - 121. (in Chinese)

[26] 廖宜涛, 李运通, 万星宇, 等. 龙门式电驱动油菜薹收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 147 - 159.
LIAO Yitao, LI Yuntong, WAN Xingyu, et al. Design and experiment of gantry type electric drive rapeseed stalks harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 147 - 159. (in Chinese)

[27] 彭继文, 廖建国, 康滨, 等. SCC12000TM 履带式起重机机电液联合仿真结果与分析[J]. 机电工程技术, 2021, 50(4): 156 - 158, 181.
PENG Jiwen, LIAO Jianguo, KANG Bin, et al. Results and analysis of mechanical-electrical-hydraulic co-simulation of the SCC12000TM crawler crane[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(4): 156 - 158, 181. (in Chinese)

[28] 朱晨辉. 履带式烟叶采收机液压行驶系统设计及控制方法研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.
ZHU Chenhui. Research on design and control method of hydraulic driving system of crawler tobacco harvester[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[29] 司癸卯, 赵明, 苟颖, 等. 基于 AMESim 的轮履复合式底盘液压系统仿真[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(2): 120 - 124.
SI Guimao, ZHAO Ming, GOU Ying, et al. Simulation on hydraulic system for composite chassis of wheel and crawler based on AMESim[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2018, 16(2): 120 - 124. (in Chinese)