

电动拖拉机综合台架试验系统设计与试验

徐立友^{1,2} 赵一荣^{2,3} 赵学平³ 刘孟楠^{1,2} 倪倩⁴

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003; 2. 拖拉机动力传动国家重点实验室, 洛阳 471039;
3. 中国一拖集团有限公司技术中心, 洛阳 471039; 4. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘要: 电动拖拉机试验具有测试对象多和物理系统复杂的特点, 单一试验系统不能满足电动拖拉机性能测试要求。根据电动拖拉机作业特点, 通过分析其动力传动系统数学模型, 确定了以电动机效率、电池组放电特性为测试变量的设计任务。采用模块化方法, 设计了能源系统试验模块、动力系统试验模块和电动拖拉机综合试验系统整体方案。通过研究试验系统总体参数设计方法, 得到了加载电动机、电池测试系统和直流电池模拟器等部件的参数计算模型。通过试验系统硬件选型匹配, 设计了可满足 90 kW 以下电动拖拉机性能测试的试验系统。在该试验平台进行了电动拖拉机性能台架试验, 结果表明: 试验测试误差与前期仿真分析误差在 10% 以内, 设计的综合台架试验系统对电动拖拉机部件性能测试的适用性较好, 满足整机性能分析和标定的试验需求。

关键词: 电动拖拉机; 试验台架; 设计; 性能试验

中图分类号: S219.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)01-0355-09

OSID:



Design and Test of Multifunctional Test System for Electric Tractor

XU Liyou^{1,2} ZHAO Yirong^{2,3} ZHAO Xueping³ LIU Mengnan^{1,2} NI Qian⁴

(1. College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China
2. National Key Laboratory of Tractor Power Systems, Luoyang 471039, China
3. YTO Group Corporation R&D Center, Luoyang 471039, China
4. Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to cope with the energy crisis and environmental pollution, the research and development process of electric tractors was accelerated at home and abroad, but there was no electric tractor products to meet the needs of tractor operation. The tractor test technology can be applied to the performance test of the whole tractor and its components. The indoor bench test played an important role in the development, test and performance improvement of new tractor products. In order to speed up the development of domestic electric tractors, a multi-performance test system was developed for electric tractors, which can realize the performance test of electric tractors' power system and energy system, as well as vehicle performance analysis. Through the force analysis and power system modeling of electric tractor plough operation, the discharge characteristics of battery packs in energy system and the efficiency characteristics of motor in power system had great influence on the operation performance of electric tractor, such as operation time and traction power. The functional requirements of electric tractor test bench were put forward, and the related characteristics of energy system and power system can be tested. According to the results of the scheme design, the design method of main equipment parameters of electric tractor test bench was put forward, including power system test module loading motor, energy system test module battery test system and DC battery simulator, and the components of the test bench were selected. The multi-functional test system of electric tractor was developed, which can complete the power system test and energy system test of electric tractor, realize the multi-function of the test bench developed, and meet the functional requirements of electric tractor development. By testing the battery pack and the motor of the power system of the electric tractor under development, the discharge performance and motor efficiency map of the battery pack can be tested, and the operation performance of

收稿日期: 2019-07-30 修回日期: 2019-10-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701002)和河南省产学研合作项目(182107000010)

作者简介: 徐立友(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事车辆传动理论与控制技术研究, E-mail: xlyou@haust.edu.cn

the electric tractor can be further obtained. The test results showed that the developed multi-performance test-bed of the electric tractor can effectively test the related performance of the motor and the battery pack, as well as the related performance of the electric tractor. The test results have good consistency with the simulation executed early, the maximum deviation is less than 10%, which means the accuracy of designed multifunction test system can meet the requirements of the development of new products of electric tractor.

Key words: electric tractor; multifunctional test bench; design; performance test

0 引言

拖拉机作为主要农业机械,配合农机具可完成犁耕、旋耕、植保和打捆等多种形式的农业作业。温室大棚等特殊作业环境对低噪声、无污染农用机械的需求越来越迫切^[1-2]。与传统拖拉机相比,电动拖拉机具有低能耗、零污染和传动效率高的特点,是农业机械发展重要方向之一^[3-4]。目前,国外电动拖拉机研究处于样机开发阶段,如2017年2月,约翰迪尔公司推出的大功率纯电动拖拉机 SESAM 样机,输出动力为 279.3 kW,可持续作业 4 h;2017年9月,芬特公司推出了中功率 e100 型纯电动拖拉机样机,输出动力为 50 kW,可持续作业 5 h^[5-8]。在国内,中国一拖集团公司于2014年推出 ET1401 型纯电动拖拉机样机,输出功率为 14 kW,采用双电机独立驱动,可持续作业 2 h;2018年又推出了“超级拖拉机 I 号”电动拖拉机样机,包含电池组智能管理系统、中置电机驱动系统和无人驾驶系统。有关高校对电动拖拉机设计方法、控制技术等方面进行了研究,逐渐形成了具有我国自主创新特点的相关理论体系,为相关技术发展和产品开发奠定了基础^[9-15]。

台架试验技术对电动拖拉机的部件匹配、总成测试、系统标定和整机性能分析等具有重要作用。利用部件或总成台架试验结果与整机之间的机电关系,可于产品开发中前期准确预测整机性能,有效提高设计开发过程的效率^[16-17]。NOVAK 等^[18]采用永磁同步电动机设计了电力驱动系统加载装置,对电动车辆驱动系统能量使用效率进行测试;HANNAN 等^[19]采用精确的电池模型开发了电动汽车电池测试系统,测试基于不同算法电池管理系统的功能;王兵^[20]和侯海源^[21]分别对串联式和并联式混合动力拖拉机进行了功能模块化设计,对试验台性能进行了仿真分析;高辉松等^[22]提出了纯电动拖拉机试验台设计方法,开发了基于 LabVIEW 的电动拖拉机测控系统;谢斌等^[23]开发了电动拖拉机驱动系统试验台架,其测试性能较好。上述研究成果对于能源系统、驱动系统的综合试验方法关注较少,难以同时满足设计开发周期内对电动拖拉机“三

电”系统的测试要求。

本文基于电动拖拉机结构方案和功能原理,设计电动拖拉机综合台架试验系统结构方案,提出主要参数和硬件匹配方法,设计适用于 90 kW 以下的电动拖拉机需求的试验系统,以为电动拖拉机产品开发提供试验和方法参考。

1 综合台架试验台结构方案

1.1 设计任务

电动拖拉机作业工况下,其动力系统输出功率消耗包括传动系统功率损失、驱动轮滑转功率损失、整机滚动阻力功率损失和牵引农具功率,即

$$P_e = P_c + P_s + P_f + P_T \quad (1)$$

式中 P_e ——电动机有效功率, kW

P_c ——传动系统损失功率, kW

P_s ——滑转损失功率, kW

P_f ——滚动阻力损失功率, kW

P_T ——牵引功率, kW

电动拖拉机牵引功率指整机牵引农具输出功率,牵引效率反映整机有效功率的利用程度,即

$$P_T = P_e \eta_c \eta_s \eta_f \quad (2)$$

式中 η_c ——传动效率 η_s ——滑转效率

η_f ——滚动效率

传动效率用于衡量整机传动系统功率损失,可用驱动轮功率与电动机有效功率比值表示。滑转效率反映驱动轮功率滑转损失,即

$$\eta_s = 1 - \delta \quad (3)$$

式中 δ ——驱动轮滑转率

拖拉机作业滑转率,可通过整车参数和驱动力等参数计算,其表达式为

$$\delta = -\delta^* \ln \left(1 - \frac{\varphi_q}{\varphi_{\max}} \right) \quad (4)$$

其中

$$\varphi_q = \frac{LF_t}{LF_{rz} + h_T F_t} \quad (5)$$

式中 φ_q ——驱动轮动载荷系数

φ_{\max} ——驱动轮最大动载荷系数

δ^* ——作业路况下特征滑转率

L ——拖拉机轴距, m F_t ——驱动力, N

F_{rz} ——拖拉机后轮静载荷, N

h_T ——牵引点高度, m

滚动效率指滚动阻力造成的功率损失, 其表达式为

$$\eta_f = 1 - \frac{F_f}{F_T} \quad (6)$$

式中 F_f ——滚动阻力, N

电动拖拉机主要用于完成田间作业, 在其作业工况下输出牵引力为

$$F_T = \frac{T_{iq} i_g i_o \eta_c}{r} - F_f \quad (7)$$

式中 F_T ——电动拖拉机牵引力, N

T_{iq} ——电动机输出转矩, N·m

i_g ——变速器传动比

i_o ——主减速器传动比

r ——驱动轮半径, m

电动拖拉机作业工况下行驶速度为

$$u = 0.377 \frac{nr}{i_g i_o} \quad (8)$$

式中 u ——电动拖拉机作业速度, km/h

n ——电动机输出转速, r/min

电动拖拉机采用电池组提供电能, 其整车能量使用效率为^[24]

$$\eta_T = \eta_d \eta_k \eta_\delta \eta_i \eta_c \quad (9)$$

式中 η_T ——整车能量使用效率

η_d ——电动机效率

η_k ——电机控制器效率

电动拖拉机额定作业时间指电池组处于荷电状态下, 可持续犁耕作业时间。拖拉机犁耕作业下额定牵引功率为

$$P_{Tn} = \frac{F_{TM} v_T}{3\ 600} \quad (10)$$

式中 P_{Tn} ——额定牵引功率, kW

F_{TM} ——额定牵引力, N

v_T ——拖拉机耕作速度, km/h

电动拖拉机电池组可输出能量为

$$W_n = C_b U_0 D_\eta \quad (11)$$

式中 W_n ——电池组可输出能量, W·h

C_b ——电池组额定容量, A·h

U_0 ——电池组放电电动势, V

D_η ——放电深度

电动拖拉机能源系统实际放电量与其作业工况有关, 能源系统实际放电量数学模型为

$$W = C_b U_0 D_\eta \left(\frac{I_b}{I} \right)^{k-1} \quad (12)$$

式中 I ——恒流放电电流, A

I_b ——实际放电电流, A

k ——放电指数

电池组容量一定的情况下, 电动拖拉机持续工作时间为

$$t = \frac{W}{3.6 \times 10^6 P_{Tn}} \quad (13)$$

综上所述, 通过测试电动拖拉机动力系统电动机 P_e 、 T_{iq} 、 n 、 η_d 和 η_k , 以及电池组放电规律和 W 等参数, 结合所开发整车相关参数, 可准确预测电动拖拉机整机性能。

1.2 综合试验系统方案设计

采用模块化设计方法, 设计包含动力系统试验模块和能源系统试验模块的电动拖拉机综合试验系统结构方案(图 1)。电动拖拉机综合试验系统测控平台控制输出控制信号, 测试电池组或电动机相关性能, 同时接收试验过程反馈测试信号, 分析试验数据。

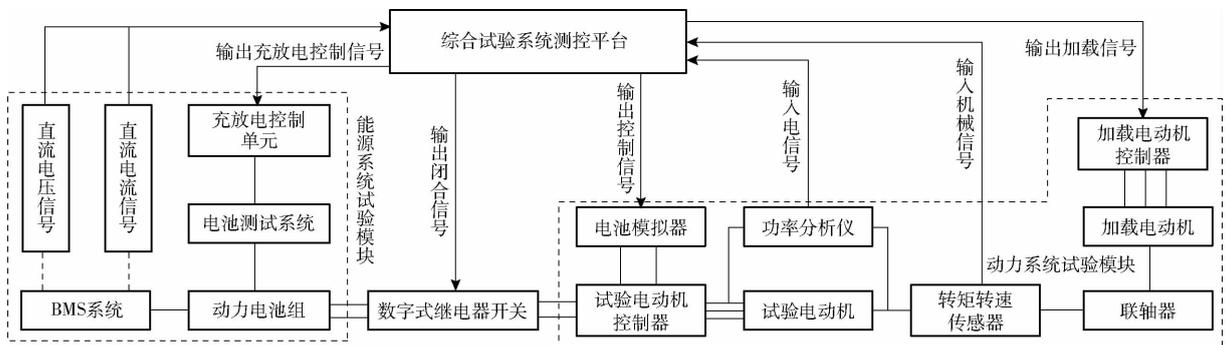


图 1 综合试验系统结构方案

Fig. 1 Structural scheme of multifunctional test system

电动拖拉机动力系统试验模块中, 电池模拟器为试验电动机控制器提供稳定的直流电, 加载电动机以试验需要的方式为试验电动机加载, 模拟电动拖拉机作业载荷。功率分析仪采集输入到试验电动机控制器和电动机的电流、电压等参数, 得到电动机

控制器和电动机的输入电功率; 转矩转速传感器测量试验电动机输出转速转矩, 得到试验电动机输出有效机械功率。上位机综合功率分析仪和转矩转速传感器采集信号, 分析计算电动机有效功率、输出转矩和转速, 以及电动机和电动机控制器工作效率。

能源系统试验模块中,上位机设置电池组以恒流、恒压和脉冲放电等工况进行试验,BMS通过直流电压电流传感器采集电池组状态信息,得到电池组实际放电容量、不同工况下可放电时间和放电规律。电动拖拉机动力系统试验模块和能源系统试验模块各控制器之间,以及各试验模块信息交互均采用CAN总线通信。

2 综合试验系统参数设计

2.1 总体参数设计

2.1.1 精度设计

试验系统精度对试验结果分析有较大影响。该试验系统由能源系统试验模块和动力系统试验模块组成,则试验系统精度为

$$E_f = E_{Df} + E_{Nf} \quad (14)$$

式中 E_f ——试验系统精度

E_{Nf} ——能源系统试验模块测量精度

E_{Df} ——动力系统试验模块测量精度

能源系统模块测量参数包括电池组电压、电流、温度和SOC,则测量精度为

$$E_{Nf} = \max(E_{if}, E_{tf}, E_{uf}, E_{Sf}) \quad (15)$$

式中 E_{if} ——电流参数测量精度

E_{tf} ——温度参数测量精度

E_{uf} ——电压参数测量精度

E_{Sf} ——SOC测量精度

动力系统模块包括转速、转矩等机械参数,以及输入试验电动机的电压、电流等电气参数,则测量精度为

$$E_{Df} = \frac{[1 - (1 - E_{Tf})(1 - E_{nf})][1 - (1 - E_{uf})(1 - E_{if})]}{2 - (1 - E_{Tf})(1 - E_{nf}) - (1 - E_{uf})(1 - E_{if})} \quad (16)$$

式中 E_{Tf} ——转矩参数测量精度

E_{nf} ——转速参数测量精度

2.1.2 量程设计

该试验系统可满足90 kW电动拖拉机动力系统和能源系统性能。测试量程有试验电动机转速和转矩范围,以及试验电池组最大放电电压和电流。

动力系统试验模块最大加载转矩需大于90 kW电动拖拉机犁耕需求,即

$$T_{\max} > \frac{r}{i\eta_c} F_t \quad (17)$$

式中 i ——总传动比

动力系统试验模块最大加载转速需满足电动拖拉机最大行驶速度需求,即

$$n_{\max} > \frac{iu_{\max}}{0.377r} \quad (18)$$

式中 u_{\max} ——拖拉机最大行驶速度,km/h

根据试验电动机峰值功率确定能源系统试验模块最大输出电压,即

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{4RP_{\max}}{\eta_k \eta_d}} \quad (19)$$

式中 R ——电池组内阻, Ω

P_{\max} ——电动机峰值功率,kW

根据负载电动机计算能源系统试验模块最大输出电流,即

$$I_m = \frac{T_m n_m}{9549 V_m \eta_m} \quad (20)$$

式中 T_m ——负载电动机最大输出功率下扭矩, $N \cdot m$

n_m ——负载电动机最大输出功率下转速,r/min

V_m ——负载电动机工作电压,V

η_m ——系统效率

2.2 模块参数设计

动力系统试验模块加载电动机为试验电动机提供负载,模拟作业工况载荷。根据动力系统输出功率计算加载电动机功率,为了保证试验电动机加载要求,加载电动机功率需满足

$$P_L = (1.2 - 1.5) P_{TM} \quad (21)$$

式中 P_L ——加载电动机功率,kW

P_{TM} ——试验电动机功率,kW

计算加载电动机功率后,需进行平均启动转矩、最小启动转矩和发热校验^[25-26]。对于本文所选用感应电动机,加载电动机启动转矩计算式为

$$T_{stav} = (0.45 \sim 0.5) (T_s + T_{cr}) \quad (22)$$

式中 T_{stav} ——平均启动转矩, $N \cdot m$

T_s ——堵转转矩, $N \cdot m$

T_{cr} ——最大转矩, $N \cdot m$

电动机最小启动转矩校验公式为

$$T_{M\min} \geq \frac{T_{L\max} K_s}{K_u} \quad (23)$$

式中 $T_{M\min}$ ——电动机最小启动转矩, $N \cdot m$

$T_{L\max}$ ——电动机最大负载扭矩, $N \cdot m$

K_u ——电压波动系数

K_s ——启动加速转矩系数

电动机发热校验等效电流法适用于交流、直流各种电动机,即

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (24)$$

式中 I_n ——单个周期负载电流曲线近似直线段分段电流,A

t_n ——分段负载持续时间,s

电池测试系统用于完成电池组恒流充放电、

恒压充放电和脉冲放电等工况测试。电池测试系统主要由变压电路、整流逆变电路、恒流电路和充放电转换电路组成,其中控制电路控制电池组充放电电流^[27-28]。电池测试系统最大输出电压和电流,参照能源系统试验模块输出峰值电压和电流设计。根据开发试验系统功能要求,选用 PWM 变压 + 双向 DC/DC 变流器结构形式的电池模拟器^[29]。电池模拟器用于为试验电动机提供电能,同时模拟不同类型电池放电特性,研究电动拖拉机最优能源系统。

3 电动拖拉机综合试验系统

3.1 硬件选型

根据电动拖拉机综合试验系统主要设备参数计算,完成试验设备选型匹配。主要有加载电动机、直流电池模拟器、电池测试系统、测量元件和测控系统,表 1 为硬件设备主要参数。

3.2 系统调试

根据电动拖拉机综合试验系统结构和参数设计,完成试验硬件选型,设计了试验系统硬件平台,图 2 为综合试验系统平台实物图。

电动拖拉机动力系统试验模块可测试电动机输出转速、转矩和效率等参数。试验电动机通过联轴器和加载电动机机械连接,变频器控制加载电动机以特定方式进行加载;电参数测量电桥可实时测量

表 1 硬件设备参数

Tab.1 Hardware device parameters

设备	参数	数值/类型	生产企业
加载电动机	最大功率/kW	90	重庆德马
	额定扭矩/(N·m)	1 074	
	最大转速/(r·min ⁻¹)	3 000	
	通信方式	CAN	
电池模拟器	硬件技术	大功率 IGBT 技术	西安迅湃
	输入电源/V	380(三相五线 AC)	
	输出功率/kW	100	
	输出电压/V	670	
	输出电流/A	-200 ~ 200	
	检测分辨率	15 mA 或 15 mV	
	通信方式	CAN、以太网	
电池测试柜	输入电源/V	380(三相五线 AC)	深圳新威尔
	输出功率/kW	±10% /50 Hz	
	输出功率/kW	100	
	输入电流/(A·相 ⁻¹)	169	
	输出电压/V	50 ~ 500	
	输出电流/A	1 ~ 200	
	通信方式	基于 TCP/IP 协议	
扭矩传感器	额定扭矩/(N·m)	2 000	YB2-2000
	额定转速/(r·min ⁻¹)	4 000	
	精度/%	±0.2	
ET4100 型测控仪	功能	采集扭矩、转速和功率信号, PID 闭环控制	四川诚邦
	通道	WT333, 三通道	
功率分析仪	精度/%	0.2	日本横河

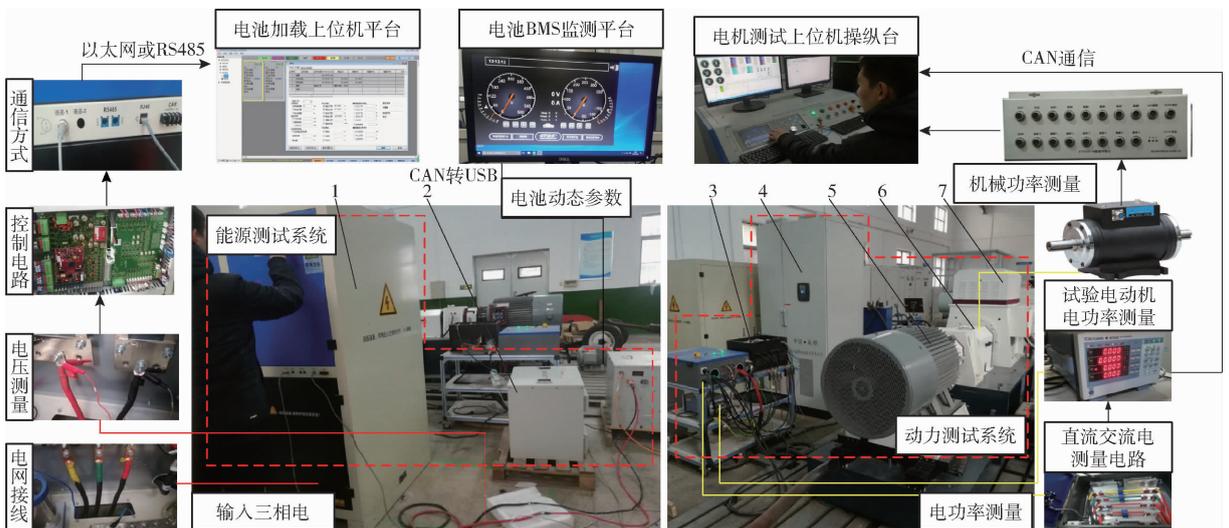


图 2 综合试验系统平台实物图

Fig.2 Physical drawing of test platform

1. 电池测试系统 2. 电池组及 BMS 系统 3. 电机控制器 4. 变频系统 5. 试验电机 6. 转矩传感器 7. 加载电机

电池模拟器和电动机试验状态下的电参数,经计算可得动力系统输入电功率;转矩传感器测量试验电动机输出转矩,加载电动机编码器测量转速,可得动力系统输出机械功率;电参数测量电桥、转矩传感器和编码器测量参数以 CAN 通信至上位机,得动力系

统试验参数。

电动拖拉机能源系统试验模块可测试电池组输出实际容量和放电规律。试验电池组正负极分别与电池模拟器端子直接连接,通过电池测试系统上位机控制电池组放电电流;电池组能量管理系统监测

记录电池组 SOC、电压和电流等。

4 试验验证

4.1 试验对象

为了验证所开发综合试验系统可实现设计任务,对电动拖拉机动力系统和能源系统进行了性能测试。该电动拖拉机动力系统采用 37 kW 直流无刷电动机;能源系统采用磷酸铁锂电池,其额定电压为 308 V,额定容量 144 A·h,额定放电电流 50 A,最高放电电压 434 V,单体电芯额定电压 3.2 V。

4.2 能源系统性能试验

为验证所开发综合试验系统功能,对电动拖拉机电池组进行了能源系统试验。由上位机控制电池测试系统,电池组从 SOC 为 100% 开始放电,当 SOC 为 20% 终止;上位机以 1 s 为步长采集放电过程中动力电池组 SOC、单体电池电压和电流。

图 3 为电池组平均单体电压随时间变化的曲线。由图可知,电池组平均单体电压随时间下降速率存在 3 个阶段:放电初期,平均单体电压下降速率较大,电池组放电较快;放电中期,平均电压下降速率较小,放电趋于平稳;放电后期,平均电压下降速率再次增加。

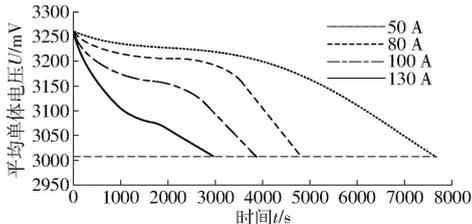


图 3 单体电压变化曲线

Fig. 3 Changing curves of single voltage

电池组 SOC 下降速率对电动拖拉机作业时间有较大影响,图 4 为电池组 SOC 随时间的变化关系。由图 4 可知,电池 SOC 随时间呈现线性变化关系,且随着放电电流增加,放电速率变快。

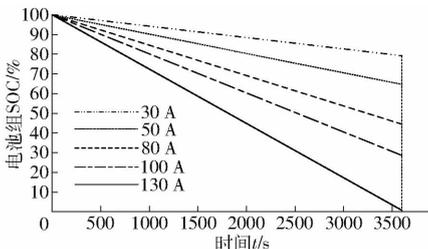


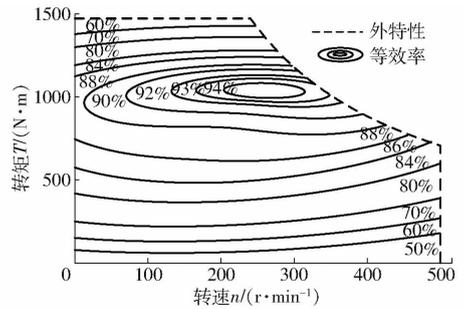
图 4 SOC 随时间变化关系

Fig. 4 Relationship between SOC and time

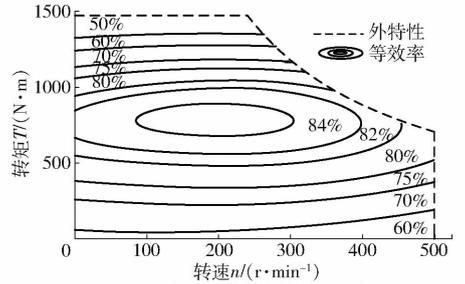
4.3 动力系统性能试验

对电动拖拉机动力系统电动机性能进行了测试,验证该试验系统可完成动力系统试验要求,图 5 为电动机试验曲线。由图 5 可知,在同一转速下,随着转

矩增加,电动机效率呈先增加而后降低的趋势;同样输出下,电动机效率高于电动机系统效率。



(a) 电动机效率map图



(b) 电动机系统效率map图

图 5 电动机试验曲线

Fig. 5 Map diagram of motor system efficiency

4.4 综合工况试验

由于所开发试验系统加载电动机转子本身具有惯性,其加载载荷变化频率难以满足电动拖拉机作业载荷谱变化频率。本文试验采用整机典型作业工况,对应权重测试整机作业性能,试验设计方法为

$$P_e = \frac{\int \omega_1 TP_1(t) + \int \omega_2 TP_2(t) + \dots + \int \omega_n TP_n(t)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

式中 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ——各工况测试权重

T ——各工况试验时间, s

P_1, P_2, \dots, P_n ——各工况整机输出功率, kW

根据文献[32]中拖拉机典型作业工况,采用重负荷率、中负荷率和轻负荷率不同权重测试整机能耗经济性。重负荷率工况包含旋耕作业、犁耕和耙耕作业,设计综合工况试验权重为 0.4;中负荷率包括中耕和收获作业,权重为 0.45;轻负荷率为运输作业工况,权重为 0.15。图 6 为综合工况电动拖拉机能耗经济性测试曲线。

由图 6 可知,电动拖拉机在综合工况下作业 6 h,整机电池组 SOC 为 23%,大于电池放电保护设计值 20%,满足整机综合工况作业能耗经济性设计要求。

4.5 牵引特性分析

通过测试动力系统和能源系统工作特性,结合电动拖拉机整机参数和滑转率,可分析整机动力性能和作业工况下能耗经济性等。图 7 为道路牵引负荷车试验,负荷车加载系统由能源部件、传感器和执

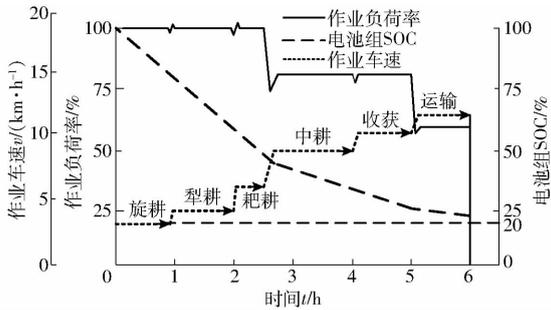


图 6 综合工况电动拖拉机能耗经济性测试曲线
Fig. 6 Energy economy test of electric tractor under comprehensive conditions

行部件等组成。能源部件为加载系统提供 220 V 交流电压；传感器测量能源系统放电状态和负荷车加载载荷；执行部件由电涡流测功机提供制动转矩传递到车轮。



图 7 道路牵引负荷车试验

Fig. 7 Road traction load vehicle test

在相同牵引力工况下，拖拉机作业滑转率与整车质量、轮距、轴距等参数相关。本文以整机参数相同的传统拖拉机为试验对象，采用牵引负荷车测试所开发电动拖拉机滑转，图 8 为电动拖拉机滑转率变化曲线。

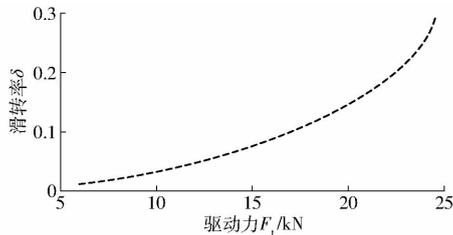


图 8 电动拖拉机滑转率变化曲线
Fig. 8 Slip rate of electric tractor

电动拖拉机调速特性反映整车驱动力和行驶车速的关系。通过动力系统电动机外特性测试，结合整机设计传动比、轮径和滑转率等参数，可分析整机调速特性。图 9 为电动拖拉机调速特性，曲线 A-B-C 为电动拖拉机 1 挡调速特性，曲线 D-E-F 为 2 挡调速特性，曲线 G-H-I 为 3 挡调速特性。

由图 9 可知，所开发电动拖拉机在 1 挡时，输出最大驱动力为 24.7 kN，行驶车速为 2.4 km/h；当电动拖拉机动力系统电动机输出功率恒定时，随着输

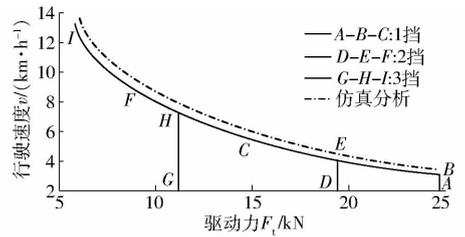


图 9 电动拖拉机调速特性

Fig. 9 Speed regulation characteristics of electric tractors

出牵引力降低，拖拉机行驶速度增加；前期基于 CRUISE 仿真分析相同驱动力输出工况下的整车行驶车速与试验分析结果误差在 10% 以内^[31]，说明试验方法的可行性和仿真实论的准确性。

结合电动拖拉机动力系统效率测试和整机参数，可分析整机牵引效率。图 10 为电动拖拉机牵引效率曲线。由图 10 可知，前期基于 CRUISE 牵引效率仿真相同驱动力工况下整机牵引效率，与试验结果误差在 10% 以内^[31]。当电动拖拉机输出牵引力逐渐增加，电机效率增加，滑转损失功率也增加，电机效率提升大于滑转损失功率，电动拖拉机牵引功率表现为增加的趋势。当电动拖拉机超过最大输出牵引功率时，滑转损失功率占主导因素，且电动机效率降低，电动拖拉机输出牵引功率降低。

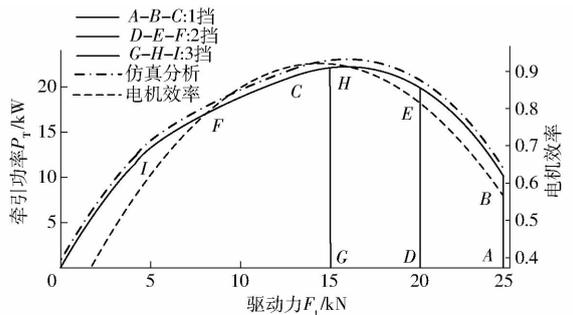


图 10 电动拖拉机牵引功率随牵引力变化曲线

Fig. 10 Relationship between traction efficiency and traction

5 结论

(1) 基于电动拖拉机动力传动数学模型，分析了影响电动拖拉机作业能力和时间的主要因素，提出了电动拖拉机试验台设计任务。采用模块化方法，设计了电动拖拉机动力系统试验模块、能源系统试验模块和整体试验系统方案，系统可完成动力系统电动机性能测试和能源系统电池组性能测试等。

(2) 根据电动拖拉机试验台结构，设计了试验系统测量精度和整体指标计算方法。对试验系统子模块进行参数计算，如加载电动机、电池模拟器和电池测试系统等。计算了试验系统加载电动机功率，经校验，所选择加载电动机可满足试验要

求。阐述了电池模拟器和电池测试系统功能及其电子结构。

(3)在设计的电动拖拉机试验平台上进行了电动机和电池组性能测试,采用 Matlab 平台对试验数

据进行处理。试验结果表明,开发的电动拖拉机多性能试验台能够有效测试整机主要性能特点;前期仿真分析与试验结果误差在 10% 以内,满足电动拖拉机台架试验功能和设计要求。

参 考 文 献

- [1] MOREDA G P, MU OZ-GARCIA M A, BARREIRO P. High voltage electrification of tractor and agricultural machinery—a review[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 115:117 – 131.
- [2] EHSANI M, GAO Y, MILLER J M. Hybrid electric vehicles: architecture and motor drives[J]. *Proceedings of IEEE*, 2007, 95(4): 719 – 728.
- [3] 谢斌, 武仲斌, 毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(8): 1 – 17. XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(8): 1 – 17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180801&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001. (in Chinese)
- [4] DU Jiuyu, OU Yang, GAO Ming, et al. Prospects for Chinese electric vehicle technologies in 2016—2020: ambition and rationality[J]. *Energy*, 2017, 120: 584 – 596.
- [5] YUKO U, JUN Y, KAZUNOBU S, et al. Study on the development of the electric tractor—specifications and traveling and tilling performance of a prototype electric tractor[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2013, 6(4): 160 – 164.
- [6] WEERACHAI A, MASAYUKI K, TOMOHIRO T, et al. Preliminary study on the applicability of an electric tractor (Part 1)—energy consumption and drawbar pull performance[J]. *Journal of JSAM*, 2001, 63(3): 130 – 137.
- [7] WEERACHAI A, MASAYUKI K, TOMOHIRO T, et al. Preliminary study on the applicability of an electric tractor (Part 2)—effect of battery allocation on the tractive performance[J]. *Journal of JSAM*, 2001, 63(5): 92 – 99.
- [8] HOSSEIN M, ALIREZA K, ARZHANG J. Evaluation of alternative battery technologies for a solar assist plug-in hybrid electric tractor[J]. *Transportation Research*, 2010, 15(8): 507 – 512.
- [9] 李同辉, 谢斌, 宋正河, 等. 电动拖拉机双电机耦合驱动系统传动特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(6): 379 – 388. LI Tonghui, XIE Bin, SONG Zhenghe, et al. Transmission characteristics of dual-motor coupling system for electric tractors[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(6): 379 – 388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190645&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.045. (in Chinese)
- [10] 卢毅, 杨福增, 刘永成, 等. 微型电动拖拉机的研究与设计[J]. *机械设计*, 2013, 30(3): 82 – 85. LU Yi, YANG Fuzeng, LIU Yongcheng, et al. Research and design of micro electric tractors [J]. *Mechanical Design*, 2013, 30(3): 82 – 85. (in Chinese)
- [11] 高辉松, 王珊珊, 朱思洪. 电动拖拉机驱动力与传动效率特性试验[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(10): 40 – 43. GAO Huisong, WANG Shanshan, ZHU Sihong. Test on driving force and transmission efficiency characteristics of electric tractors [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(10): 40 – 43. (in Chinese)
- [12] 蔡高奎, 夏长高. 电动拖拉机电动悬挂系统的设计与性能仿真[J]. *农机化研究*, 2015, 37(1): 140 – 143. CAI Gaokui, XIA Changgao. Design and performance simulation of electric tractor suspension system [J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37(1): 140 – 143. (in Chinese)
- [13] 刘孟楠, 周志立, 徐立友, 等. 基于随机载荷功率谱的电动拖拉机复合能量系统研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 358 – 366. LIU Mengnan, ZHOU Zhili, XU Liyou, et al. Electric tractor energy system and management strategy research based on load power spectral density[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 358 – 366. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180247&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.047. (in Chinese)
- [14] XU Liyou, ZHU Shaomin, XUE Zhifei, et al. An artificial neural network controller of a permanent magnet brushless motor for electric tractors[J]. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, 2016, 17(45): 5.1 – 5.5.
- [15] LIU Mengnan, XU Liyou, ZHOU Zhili. Design of a load torque based control strategy for improving electric tractor motor energy conversion efficiency[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016(5): 1 – 14.
- [16] 郭晓博, 李京忠, 任越光, 等. 我国拖拉机试验技术发展概况与展望[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2014, 41(1): 1 – 3, 7. GUO Xiaobo, LI Jingzhong, REN Yueguang, et al. Development and prospect of tractor experiment technology in China[J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2014, 41(1): 1 – 3, 7. (in Chinese)
- [17] BRAGHIN F, GENOESE A, SABBIONI E, et al. Experimental evaluation of different suspension systems for agricultural vehicles through four-poster test bench[C]//*Proceedings of the Mini Conference on Vehicle System Dynamics*, 2008:491 – 498.
- [18] NOVAK M, NOVAK J. Test setup with a permanent magnet synchronous machine for efficiency maps of an electric vehicle[C]//

- Proceedings-2018 23rd International Conference on Electrical Machines, 2018:1698 – 1703.
- [19] HANNAN M A, AZIDIN F A, MOHAMED A. Test bench model and algorithms for multi-sources light electric vehicle energy management system[C]//IEEE Industry Application Society—51st Annual Meeting, 2015.
- [20] 王兵. 串联式混合动力拖拉机试验台的研究与开发[D]. 南京:南京农业大学,2015.
WANG Bing. Research and development of series hybrid tractor test-bed [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [21] 侯海源. 混合动力拖拉机试验台设计研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2014.
HOU Haiyuan. Design and research of hybrid tractor test bed [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [22] 高辉松, 朱思洪. 电动拖拉机试验台开发[J]. 南京农业大学学报, 2014, 37(6): 160 – 164.
GAO Huisong, ZHU Sihong. Development of electric tractor test-bed [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2014, 37(6): 160 – 164. (in Chinese)
- [23] 谢斌, 张超, 毛恩荣, 等. 基于 myRIO 的电动拖拉机驱动控制器设计与室内试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 55 – 62.
XIE Bin, ZHANG Chao, MAO Enrong, et al. Motor controller design and indoor experiment for electric tractor based on myRIO[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 55 – 62. (in Chinese)
- [24] 徐立友, 刘孟楠, 周志立. 串联式混合动力拖拉机驱动系设计[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 11 – 18.
XU Liyou, LIU Mengnan, ZHOU Zhili. Design of drive system for series hybrid electric tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(9): 11 – 18. (in Chinese)
- [25] KATO M, ITOH J I. Stabilization method of current regulator for electric vehicle motor drive systems under motor parameter mismatch conditions[C]//Conference Proceedings—IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC, 2017: 599 – 606.
- [26] LONCARSKI J, LEIJON M, SRNDOVIC M. Comparison of output current ripple in single and dual three-phase inverters for electric vehicle motor drives[J]. Energies, 2016, 8(5): 3832 – 3848.
- [27] LI Gechen, WANG Haiying. Study on fuzzy control in power battery testing system[C]//2007 IEEE International Conference on Control and Automation, 2007:1110 – 1112.
- [28] DU Chunlin, LI Heming, ZHANG Lixia. Application of three-phase current source converter in power battery testing system for electric vehicles[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008:4205 – 4209.
- [29] CHOI S C, LEE J H, NOH Y S, et al. Load and source battery simulator based on Z-source rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(8): 6119 – 6134.
- [30] 李忠利, 闫祥海, 周志立, 等. 负荷车电涡流缓速器加载控制系统研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(3): 126 – 131.
LI Zhongli, YAN Xianghai, ZHOU Zhili, et al. Research on the load control system of eddy current retarder for load car[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(3): 126 – 131. (in Chinese)
- [31] 刘孟楠, 徐立友, 周志立, 等. 增程式电动拖拉机及其旋耕机组仿真平台开发[J]. 中国机械工程, 2016, 27(3): 413 – 419.
LIU Mengnan, XU Liyou, ZHOU Zhili, et al. Establishment of extended range electric tractor and its rotary cultivator's simulative platforms [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(3): 413 – 419. (in Chinese)
- [32] 徐立友. 拖拉机液力机械无级变速器特性研究[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
XU Liyou. Study on the characteristics of tractor hydraulic mechanical CVT[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)