

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.03.044

# 增程式电动履带拖拉机设计与试验

王宝超 乔明睿 初香港 尚书旗 王东伟

(青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

**摘要:** 针对缺乏适宜温室大棚作业的小功率电动拖拉机的问题, 本文设计了一台 10 kW 增程式电动履带拖拉机, 完成了工况分析、电驱系统设计和试验。针对行走、旋耕、开沟工况进行了性能测试, 试验结果表明所设计的增程式电动拖拉机能够实现传统燃油履带式拖拉机所具备的功能。测试结果表明, 速度 4.8 km/h 行走工况电动机消耗功率约为 3.2 kW, 速度 2 km/h 旋耕作业工况电机消耗功率约为 3.75 kW, 速度 2 km/h 开沟工况电机消耗功率约为 3.3 kW。当前电池配置下, 可以支持行走工作 2.2 h, 旋耕工作 1.9 h 和开沟工作 2.1 h, 纯电模式基本满足小规模温室大棚零排放作业需求。需要持续大负载工作时, 增程式电动拖拉机可以启动增程器与电池协同供电以实现持续工作。

**关键词:** 增程式电动拖拉机; 履带; 驱动系统; 小功率

中图分类号: S219.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)03-0431-09

OSID:



## Design and Experiment on Extended-range Electric Caterpillar Tractor

WANG Baochao QIAO Mingrui CHU Xianggang SHANG Shuqi WANG Dongwei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

**Abstract:** Electric tractors have the advantages of strong power, energy saving and emission reduction, simple structure, reliability and durability, which have become the focus of research at home and abroad. A 10 kW extended-range electric caterpillar tractor was developed, and the working condition analysis, electric drive system design, prototype trial production and field test were completed. The performance test and analysis were carried out for walking, rotary tillage and ditching conditions, and the results showed that the designed extended-range electric tractor was competent for the functions of traditional tractors. With the configuration, the motor output power was about 3.2 kW when the tractor walked at 4.8 km/h, about 3.75 kW when rotating tillage at 2 km/h, and about 3.3 kW when ditching at 2 km/h. Under the current battery configuration, it can support 2.2 h walking, 1.9 h rotary tillage and 2.1 h ditching, and the pure electric mode can basically meet the needs of zero-emission operations in small-scale greenhouses. When continuous large load operation was required, the range extender electric tractor can start the range-extender to co-power or charge the battery. The design of the extended-range electric crawler tractor was completed, and the specific data of the electric tractor for the common working status as transporting, rotating tillage and ditching was explored. The major performance of the electric tractor, including drive system power and range extension system, was verified which provided a certain basis for the subsequent improvement and parameter optimization configuration of the extended-range electric caterpillar tractor.

**Key words:** extended-range electric tractor; caterpillar; drive system; small power

## 0 引言

电动拖拉机具有动力强劲、节能减排、结构简单

的作业特点, 但目前针对电动拖拉机的研究主要以中大功率型号为主<sup>[1-3]</sup>, 在 21 世纪初期国外对电动拖拉机驱动系统进行了相关研究<sup>[4-5]</sup>, 美国通用电

收稿日期: 2022-11-03 修回日期: 2023-01-18

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2022YFE0125800)、山东省自然科学基金项目(ZR2021ME018)和鲁渝科技协作计划项目(2021LYXZ013)

作者简介: 王宝超(1985—), 男, 教授, 主要从事新能源农业装备研究, E-mail: wangbaochao@qau.edu.cn

通信作者: 王东伟(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: w88030661@163.com

气公司生产的 e-ATV 系列电动拖拉机,额定功率为 4.8~6.2 kW,由后桥电机直接驱动,可实现无级变速<sup>[6]</sup>,FLORENTSEV 等<sup>[7]</sup>对电动拖拉机的传动系统进行了相关研究,德国芬特公司<sup>[8]</sup>生产的 E100-Vario 型纯电动拖拉机,额定功率 100 kW,瞬时输出功率可达 150 kW。

国内也对电动拖拉机的驱动系统进行了研究<sup>[9-11]</sup>,汪珍珍等<sup>[12]</sup>建立了基于快速控制原型电动拖拉机测控系统,用于测试混动模式下发电机的性能,徐立友等<sup>[13]</sup>通过解析计算给出了一种串联式混合动力拖拉机的配置参数,并以解析方法与燃油机型进行了对比,计算结果表明增程式电动拖拉机经济性提高了 5.37%,武仲斌等<sup>[14]</sup>对电动拖拉机的电池负载构型进行了优化,仿真结果表明能量利用率提升 5.66%,赵静慧等<sup>[15]</sup>通过解析计算给出 110 kW 的增程式电动拖拉机驱动系统机械部分参数设计、动力性能和经济性结果。上述研究仅以解析计算或仿真为主,未涉及样机试制和实验结果。

本文结合小功率履带式拖拉机在不同工况下的工作特点,分析主要工况下的动力需求,设计一款增程式电动拖拉机的电驱系统,并进行试验验证。采集电动拖拉机在不同工况下的负载信息,以期履带式电动拖拉机研制提供技术支撑。

## 1 总体方案布置

本文选择增程式电动架构<sup>[16]</sup>,采用单电机集中型驱动的动力形式,整体如图 1 所示,主要包括增程器、动力电池、电机驱动器、散热器、主传动电机、变速箱、驱动轮、动力输出轴、电子油门。

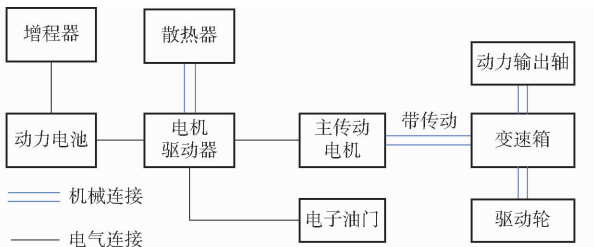


图 1 增程式电动拖拉机驱动系统架构

Fig. 1 Extended-range electric tractor electromechanical drive system architecture

整机实物如图 2 所示。动力电池与驱动器位于拖拉机车架上方,主传动电机和增程器位于车架中部,摆放原则是使拖拉机配重保持平衡,防止因重心偏移导致歪斜、倾覆等问题。动力电池作为整车的主要能量源,为主传动电机供电,主传动电机与变速箱通过传输带相连,变速箱接拖拉机的履带行走机构和作业机构;增程器作为辅助能源,当动力电池电量较低时,启动增程器,实现由增程器到动力电池和

负载的能量传递,提高电动拖拉机的续航能力;电子油门控制部件给电机驱动器控制信号,用于控制电机来实现拖拉机行走与作业。

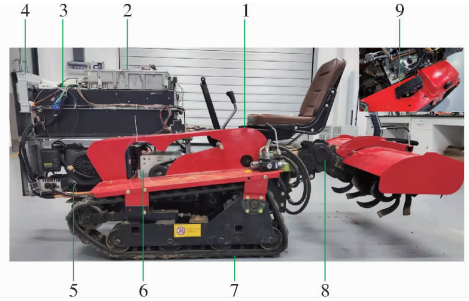


图 2 增程式电动拖拉机整机实物图

Fig. 2 Main structure of extended-range electric tractor

1. 变速箱 2. 电机驱动器 3. 动力电池 4. 散热器 5. 增程器
6. 主传动电机 7. 驱动轮 8. 动力输出轴 9. 电子油门

## 2 电动拖拉机工况分析及关键电驱部件设计

履带式电动拖拉机需要装配不同的机具进行旋耕、开沟、回填、锄草、起垄等作业。依据经验公式<sup>[17-18]</sup>并结合实际工况需求,确定电动拖拉机受力分析过程中所涉及的土壤、路面接触参数和物理参数(表 1),从而计算出电动拖拉机在不同工况下功率需求,在此基础上完成电驱系统的选型设计。

表 1 电动拖拉机作业过程中主要物理参数

Tab. 1 Values of main physical parameters during operation of electric tractors

参数	数值
行走摩擦因数	0.3
旋耕宽度/cm	90
旋耕深度/cm	10~20
旋耕比阻/Pa	60~2 200
旋耕比例系数	1.1~1.3
旋耕摩擦因数	0.6
开沟阻力系数	0.5
开沟比例系数	0.2~1.1
切土阻力系数	1.8~3.1
开沟刀刀辊数量	8
刀辊半径/cm	21.5
开沟宽度/cm	30
开沟深度/cm	10~20
侧切刃长度/cm	18.5

### 2.1 行走工况

在行走作业时,履带式电动拖拉机速度较低,电动拖拉机主要受摩擦力的影响,忽略所受的空气阻力和加速阻力,因此主传动电机提供的功率需大于克服摩擦力所做的功率,行走作业所需功率为

$$P_1 = \frac{V_1 F_{\text{fl}}}{3600 \eta_m} + P_0 \quad (1)$$

$$\text{其中 } F_{f1} = \mu_1 m_1 g \quad (2)$$

式中  $P_1$ ——行走所需总功率, kW

$P_0$ ——机械部件传动过程中的能量损失, kW

$V_1$ ——行走时速度, km/h

$F_{f1}$ ——行走过程中所受摩擦力, N

$\mu_1$ ——行走过程中经过不同地面的摩擦因数

$\eta_m$ ——电机效率, 取 0.85

$m_1$ ——拖拉机整车质量, kg

对于本次试验目标履带式拖拉机, 整车质量约 900 kg, 考虑能量传递过程中的功率损失, 按照 10% 计算, 结合式(1)、(2), 电动拖拉机在执行行走作业时所需功率应为 1.6 ~ 5.5 kW。

## 2.2 旋耕工况

在旋耕作业时, 拖拉机速度较低, 因此忽略空气阻力与加速阻力, 在旋耕过程中所受到的阻力为拖拉机本身行走的阻力和旋耕机作业的阻力之和<sup>[19]</sup>, 旋耕作业功率为

$$P_2 = \frac{F_{f2} V_2 + F_1 V_1}{3600 \eta_m} + P_0 \quad (3)$$

$$\text{其中 } F_{f2} = \mu_2 m_2 g \quad (4)$$

$$F_1 = \frac{1}{75} abNN_x V_2 \quad (5)$$

式中  $P_2$ ——旋耕所需功率, kW

$V_2$ ——旋耕作业时速度, km/h

$F_1$ ——牵引旋耕机动力, N

$F_{f2}$ ——旋耕过程中所受摩擦力, N

$a$ 、 $b$ ——旋耕宽度、深度, cm

$N$ ——比例系数

$N_x$ ——旋耕比阻

$\mu_2$ ——旋耕作业时摩擦因数

$m_2$ ——电动拖拉机进行旋耕作业时质量, kg

旋耕作业时速度为 0.5 ~ 2 km/h, 根据式(3) ~ (5) 求出电动拖拉机在旋耕时所需功率为 2.0 ~ 6.0 kW。

## 2.3 开沟工况

在开沟作业时, 所受阻力主要包括行走阻力和开沟刀牵引阻力, 开沟刀牵引阻力由土壤摩擦力、切土阻力和牵引开沟刀的阻力组成<sup>[20-21]</sup>, 开沟所需要功率为

$$P_3 = \frac{F_{\beta} + F_2}{3600 \eta_m} V_3 + P_0 \quad (6)$$

$$\text{其中 } F_2 = \theta G_1 + K_c \frac{2\pi R l}{Z\lambda} \quad (7)$$

$$F_{\beta} = \mu_3 m_3 g \quad (8)$$

式中  $P_3$ ——开沟所需功率, kW

$F_2$ ——牵引开沟刀所需牵引力, N

$\theta$ ——开沟作业时阻力系数

$\lambda$ ——开沟比例系数

$G_1$ ——开沟刀重力, N

$K_c$ ——切土阻力系数

$Z$ ——开沟刀刀辊数量

$l$ ——侧切刃长度, cm

$V_3$ ——开沟作业时速度, km/h

$F_{\beta}$ ——开沟过程中所受摩擦力, N

$\mu_3$ ——开沟作业时摩擦因数

$m_3$ ——电动拖拉机进行开沟作业时质量, kg

开沟刀质量为 20 kg, 根据式(6) ~ (8) 计算出开沟时所需要的功率为 2.0 ~ 4.0 kW。

## 2.4 电动机参数选型

电动拖拉机作业工况复杂, 所承受的负载多变, 对瞬时功率的输出要求较高。本文选择永磁同步电机作为增程式电动拖拉机的主传动电机。永磁同步电机具有转矩性能好、过载能力强、功率密度高和可靠性高等特点<sup>[22]</sup>, 符合电动拖拉机工作特点。

通过多工况受力分析, 电动拖拉机在旋耕时消耗功率最大, 电机额定功率应满足旋耕所需功率的 1.1 ~ 1.6 倍, 电机额定功率与峰值功率为

$$P_N \geq (1.1 \sim 1.6) P_2 \quad (9)$$

$$P_{N\max} \geq (1.5 \sim 2) P_N \quad (10)$$

式中  $P_N$ ——电机额定功率, kW

$P_{N\max}$ ——电机峰值功率, kW

与传统内燃机动力的拖拉机特性完全不同, 电机除了连续工作的额定功率外, 还具备短时间内 1.5 ~ 2 倍的峰值过载能力。因此, 峰值功率是电动拖拉机选型的重要特征, 电动拖拉机给出最大峰值功率对于用户最终评价拖拉机性能和选型有着重要指导意义。

电机输出转矩为

$$T_{\max} = \frac{9550 P_{N\max}}{n} \quad (11)$$

式中  $T_{\max}$ ——电机最大输出转矩, N·m

$n$ ——电机转速, r/min

选用电机额定电压为 80 V, 经过计算, 选用电机额定功率为 10 kW, 峰值功率为 20 kW。

## 2.5 动力电池参数选型

考虑动力电池安全性和经济性以及技术成熟度的要求<sup>[23]</sup>, 选择锂电池作为动力电池。根据电机的母线工作电压和旋耕作业时的最大功率来确定动力电池容量为

$$C_b = \frac{1000}{U_m h_k} \left( \frac{P_2}{\eta_{mc}} + P_0 \right) \quad (12)$$

式中  $C_b$ ——动力电池容量, A·h

$U_m$ ——电机母线电压, V  
 $h_k$ ——锂电池放电深度, 取 0.8  
 $\eta_{mC}$ ——电机控制器和电动机效率乘积, 取 0.81

动力电池的额定电压应与电机的额定电压相匹配, 所选动力电池的标称电压为 76.8 V, 额定容量为 100 A·h, 能量为 7.7 kW·h。

### 2.6 增程器参数选型

增程器发出功率应满足电动拖拉机最低速度下旋耕作业时消耗的功率。增程器额定输出功率为

$$P_z = \frac{(F_{f2} + F_1) V_{2min}}{3600\eta_i} \quad (13)$$

式中  $P_z$ ——增程器额定功率, kW  
 $V_{2min}$ ——旋耕作业最低速度, 取 0.5 km/h  
 $\eta_i$ ——增程器能量利用效率, 取 0.85

根据式(13), 选用额定功率为 3 kW 的汽油发电机作为增程器, 额定转速为 2 200 r/min。

### 2.7 电驱系统参数

根据工况分析并参考市场上实际可用零部件进行选型, 最终所设计的电驱系统部件参数如表 2 所示。

表 2 电驱系统主要技术参数

Tab.2 Main technical parameters

部件	参数	数值
电机	额定电压/V	80
	额定功率/kW	10
	峰值功率/kW	20
	额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2 500
	峰值扭矩/(N·m)	76
动力电池	标称电压/V	76.8
	电池容量/(A·h)	100
	能量/(kW·h)	7.7
增程器	额定功率/kW	3
	额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2 200

### 2.8 电驱系统控制原理

电动拖拉机主传动电机控制采用永磁同步电机磁场定向矢量驱动和转矩闭环控制<sup>[24]</sup>, 在  $d$  轴电流  $i_d = 0$  时, 通过电子油门踏板信号控制  $q$  轴电流  $i_q^*$ , 独立控制电磁转矩, 继而控制电动拖拉机行进速度, 从而获得不同速度下的负载信息, 控制系统框图如图 3 所示。

## 3 试验

### 3.1 行走工况

在硬质水泥路面进行行走测试, 测试时速度为 4.80 km/h, 试验测试装置主要由示波器、电压差分探头、电流传感器组成(图 4)。

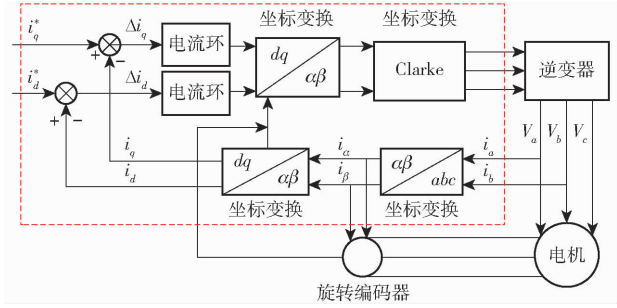


图 3 电动拖拉机主传动电机矢量控制原理图

Fig.3 Vector control schematic

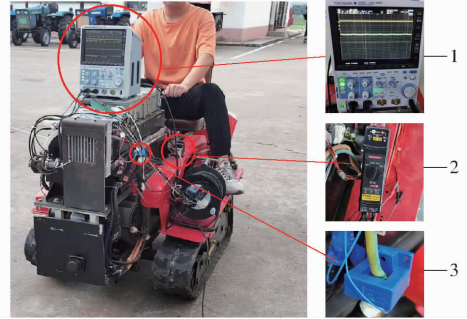
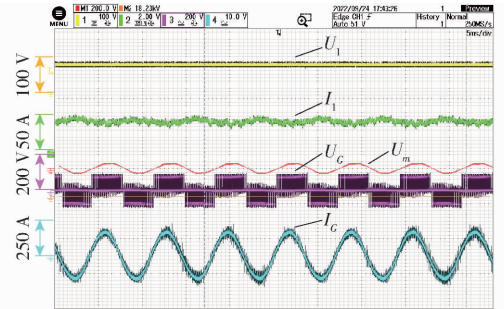


图 4 试验测试装置

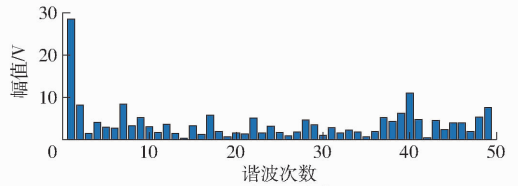
Fig.4 Test device

1. 示波器 2. 电压差分探头 3. 电流传感器

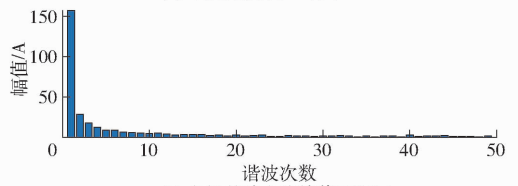
在行走测试时, 利用示波器实时记录动力电池与电机输出电流和电压, 如图 5 所示。



(a) 电机、动力电池输出特性



(b) 电机基波电压峰值 28.49 V



(c) 电机基波电流峰值 157.5 A

图 5 行走作业时动力电池与电机负载特性

Fig.5 Load characteristics of power battery and motor during transportation operation

采集动力电池输出电压  $U_1$ , 动力电池输出电流  $I_1$ , 电机输出电压  $U_c$ , 电机输出电流  $I_c$ , 此时动力电池

输出电压  $U_1$  为 77.6 V, 输出电流  $I_1$  为 45 A, 当拖拉机处于行走作业时, 电池输出功率约为 3.5 kW。

采集的电机电压  $U_c$  包含斩波信息, 经过滤波后得到波形  $U_m$  (图 5a)。此时电机功率为

$$P = \sqrt{3}ui\eta_m \cos\varphi \quad (14)$$

式中  $P$ ——电机平均功率, kW

$u$ ——电机线电压有效值, V

$i$ ——电机线电流有效值, A

$\varphi$ ——电压与电流的相位差, ( $^\circ$ )

对电机电压和电流进行傅里叶分析, 可以得到基波信息, 滤波后电机峰值电压和峰值电流各除以  $\sqrt{2}$ , 可得到基波电压和电流有效值, 同时电压与电流相位差为  $13^\circ$ , 代入式(14), 求得电机输出基波功率为 3.2 kW。

以同样方法分别采集动力电池和电机在整车速度为 1.44、2.08 km/h 的输出特性, 如表 3、4 所示。

表 3 电池在电动拖拉机不同行走速度时的输出功率

Tab. 3 Output power of power battery at different speeds of electric tractors

速度/( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	输出电流/A	输出电压/V	功率/kW
2.08	35	77.5	2.71
1.44	28	77.6	2.17

表 4 电机在电动拖拉机不同行走速度时的输出功率

Tab. 4 Output power of motor at different speeds of electric tractors

速度/ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	线电流有 效值/A	线电压有 效值/V	相位差/ ( $^\circ$ )	功率/kW
2.08	122	16.35	35	2.40
1.44	120	13.23	40	1.80

为了验证所选电机的可控性和过载能力, 利用上位机软件获取拖拉机在不同速度下电机输出转矩的实时变化曲线, 如图 6 所示。

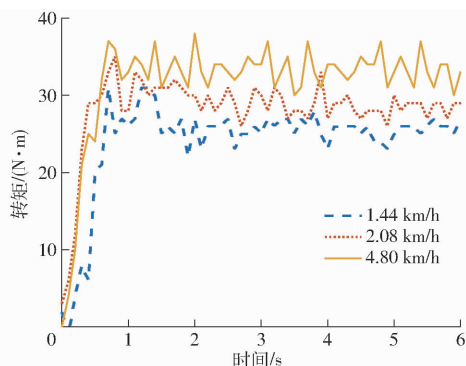


图 6 不同速度行走时电机输出转矩

Fig. 6 Motor output torque at different speeds

行走测试时, 试验环境选用水泥地面, 电动拖拉机在行走测试中所受摩擦因数不变, 仅存在履带孔

隙与主动轮齿受力结构导致的转矩波动, 转矩波动在  $\pm 10\%$  内, 不同速度行走作业时电动机平均输出转矩约为  $30 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。随着速度的增加, 转矩增幅与转速增幅存在一定的比例关系, 与式(1)的规律一致。

### 3.2 旋耕工况

电动拖拉机田间作业时, 电动拖拉机工作在低速大扭矩的情况下, 在土槽实验室进行了性能测试 (图 7), 旋耕深度为 10 ~ 12 cm, 土壤含水率为 12%, 土壤坚实度为 200 ~ 225 Pa, 旋耕幅宽为 90 cm, 旋耕作业速度为 2 km/h。



图 7 旋耕作业时数据信息采集

Fig. 7 Collecting data information during rotary tillage operations

在旋耕时采集的电动拖拉机电机和动力电池输出电流和电压波形如图 8 所示。

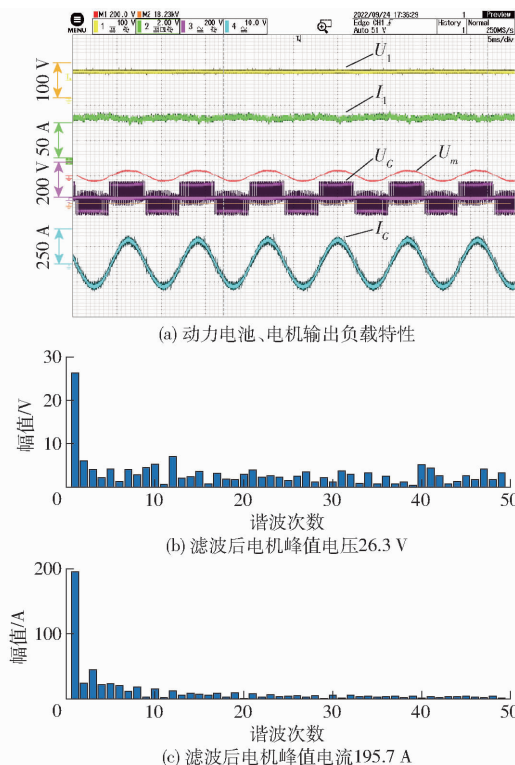


图 8 旋耕作业时动力电池与电机负载特性

Fig. 8 Load characteristics of power battery and motor during rotary tillage

此时动力电池输出电流平均值为 53.25 A, 动力电池输出电压平均值为 77.8 V, 动力电池输出功率为 4.14 kW; 电机输出电流有效值约为 138 A, 电机电压有效值为 18.61 V, 此时电压与电流的相位

差为 $8^\circ$ ,电机输出功率为3.75 kW。

用同样的方法测试并计算,得出动力电池和电机旋耕速度为0.5、1.2 km/h的负载输出特性,如表5、6所示。旋耕时不同速度下电机输出转矩如图9所示。

表5 电池在电动拖拉机不同速度旋耕时的输出功率

Tab.5 Output power of power battery at different speeds rotary ploughing of electric tractor

速度/( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	输出电流/A	输出电压/V	功率/kW
1.2	40	78.2	3.12
0.5	35	78.3	2.74

表6 电机在电动拖拉机不同速度旋耕时的输出功率

Tab.6 Output power of motor in electric tractor rotary ploughing at different speeds

速度/ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	线电流 有效值/A	线电压 有效值/V	相位差/ ( $^\circ$ )	功率/ kW
1.2	104.20	18.48	9	2.80
0.5	82.98	16.26	15	1.95

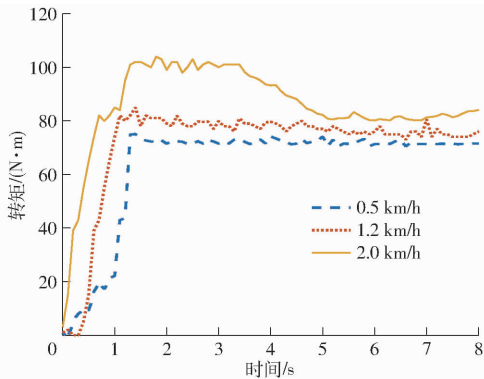


图9 不同速度旋耕时电机转矩变化曲线

Fig.9 Variation curves of rotational speed and torque during rotary tillage

由图9可知,在旋耕作业时,当电动拖拉机前进速度为2 km/h,电机输出转矩最大,启动阶段瞬时输出转矩可达 $100\text{ N}\cdot\text{m}$ ,稳定后,电机输出转矩约为 $81\text{ N}\cdot\text{m}$ ,在作业速度0.5、1.2 km/h时,电机输出转矩波动较小,输出转矩约为 $72$ 、 $78\text{ N}\cdot\text{m}$ ,且在测试过程中,电机表面温升小于 $10^\circ\text{C}$ ,散热可靠。

### 3.3 开沟工况

在土槽实验室进行开沟试验(图10),开沟宽度为20 cm,开沟深度为10 cm,土壤含水率为12%,土壤坚实度为220 Pa,拖拉机前进速度为2 km/h。电动拖拉机在开沟作业时采集的负载信息如图11所示。

当电动拖拉机开沟作业时,动力电池输出平均电流为48 A,动力电池输出平均电压为78.77 V,动力电池输出功率为3.78 kW;电机输出电流有效值

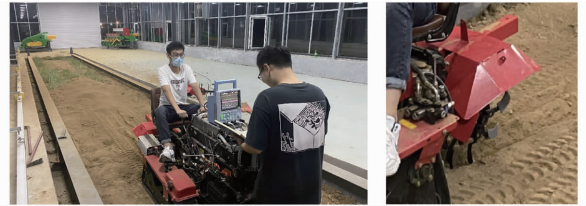
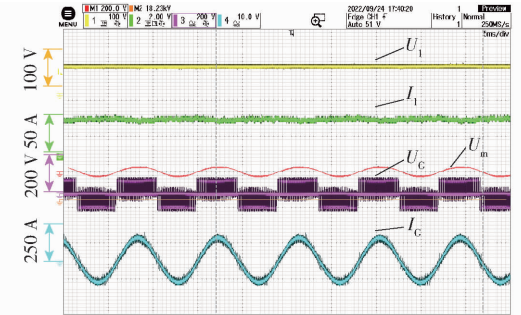
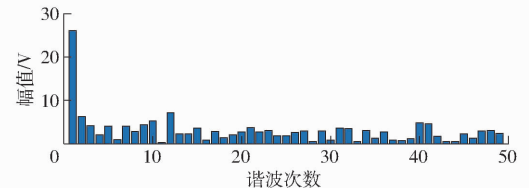


图10 开沟作业时的数据信息采集

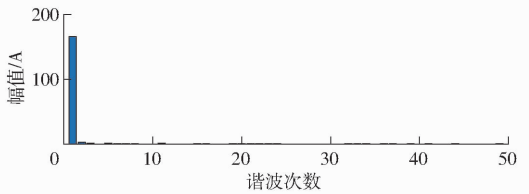
Fig.10 Collecting data information during trenching operations



(a) 电池、电机输出负载特性



(b) 滤波后电机峰值电压27.01 V



(c) 滤波后电机峰值电流166.1 A

图11 开沟作业时动力电池与电机的负载特性

Fig.11 Load characteristics of power battery and motor during trenching operation

为117.45 A,输出电压有效值为19.1 V,电压与电流相位差为 $5^\circ$ ,根据式(14)计算,电机输出功率约为3.3 kW。

用同样的方法计算出动力电池和电机在0.5、1.2 km/h的负载输出特性,如表7、8所示。开沟作业时不同速度下电机输出转矩如图12所示。由图12可知,在开沟作业时,电动机瞬时输出转矩可达 $80\text{ N}\cdot\text{m}$ ,在作业速度0.5、1.2 km/h的情况下,电机输出转矩波动较小,平均输出转矩约为 $50\text{ N}\cdot\text{m}$ 。由于开沟刀仅有2排,齿数稀疏,较旋耕作

表7 电池在电动拖拉机不同速度开沟时的输出功率

Tab.7 Output power of power battery in trenching of electric tractor at different speeds

速度/( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	输出电流/A	输出电压/V	功率/kW
1.2	38.5	78.2	3.01
0.5	30.0	78.3	2.34

表8 电机在电动拖拉机不同速度开沟时的输出功率  
Tab.8 Output power of motor in trenching of electric tractor at different speeds

速度/ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	线电流 有效值/A	线电压 有效值/V	相位差/ ( $^{\circ}$ )	功率/kW
1.2	101.30	16.62	12	2.42
0.5	82.98	15.58	20	1.78

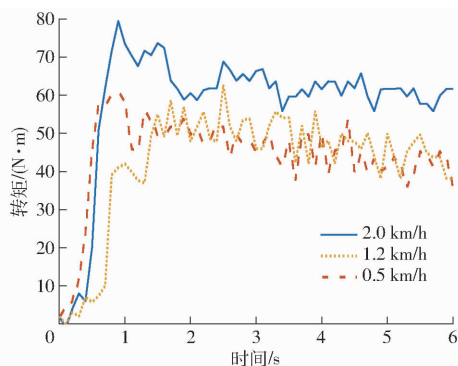


图12 不同速度开沟时电机输出转矩

Fig.12 Motor output torque at different speeds trenching

业时的负载波动更大。

### 3.4 不同工况下动力电池续航性能分析

电动拖拉机在纯电模式下的续航时间是衡量电动拖拉机性能的重要指标之一。动力电池放电容量与放电速率、温度、终止电压均有关系<sup>[25]</sup>,标准工况下所选用的电池出厂测试放电性能如图13所示,可以看出动力电池以100 A的持续电流放电时,放电至62 V截止电压的时间约为1.05 h,满足76.8 V、100 A·h的标称规格。

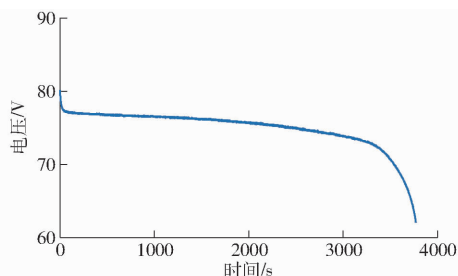


图13 动力电池放电特性分析

Fig.13 Analysis of discharge characteristics of power battery

通过预估分析,当电动拖拉机以速度4.8 km/h行走时,动力电池平均放电电流为45 A,纯电模式下一次性行走时间约为2.2 h;当电动拖拉机以速度2 km/h进行旋耕作业时,平均放电电流为53 A,纯电模式下一次性作业时间约为1.9 h;当以速度2 km/h进行开沟作业时,平均输出电流为48 A,纯电模式下一次性作业时间约为2.1 h;由于实际工况下放电电流比电池出厂测试时更小,动力电池在放

电过程中的能量损耗会减少,预估实际作业时间会略长于预估时间。

### 3.5 增程器发电性能测试

针对选用的增程器进行了测试。增程器在燃油转动带动发电机发出交流电,经自身整流控制后最终输出直流电,对电池进行能量补给。开启增程器后,采集测量到的增程器输出电流 $I_2$ 与电压 $U_2$ ,如图14所示。

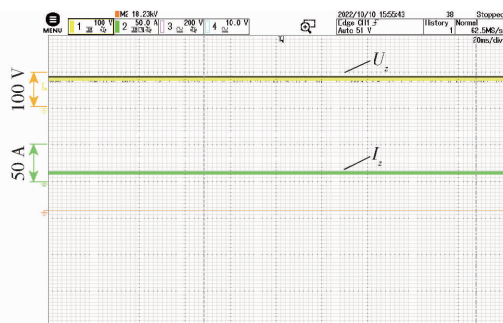


图14 增程器发出实际功率

Fig.14 Actual power generated by augments

实测增程器输出电压约79.5 V,电流约13.1 A,计算得增程器对电池充电功率仅为1 kW,未能实现3 kW设计输出。经分析,其原因在于市售增程器只针对额定电压进行标注,而铅酸电池和锂电池在充电过程中的电压变化是不同的。铅酸电池模块电压额定为12 V,满电为14.4 V。锂电池规格比较多,串联电芯数量差别较大,没有固定标准,额定与满电时电压变化与铅酸电池有区别,容易导致充电时出现降额现象。因此特别要注意的是,当需要增程器与锂电池匹配时,需要根据锂电池特性定制增程器电压,才能充分发挥增程器的作用。

## 4 结论

(1)对电动拖拉机的主要工况进行了受力分析,设计了一款增程式电动履带拖拉机,所设计的增程式电动拖拉机能够实现传统燃油履带拖拉机所具备的行走和作业功能,还可实现纯电模式零排放作业。

(2)通过电驱系统实测得出了该型履带拖拉机的实际工作功率,该型履带拖拉机质量约900 kg,从动力电池端测得功率消耗为:行走工况2.7~3.5 kW、旋耕工况2.7~4.1 kW、开沟工况2.7~3.8 kW。

(3)当前电池配置下,所设计的动力电池能实现纯电模式下连续工作约2 h,持续作业时需要启动增程器来补充能量。

## 参 考 文 献

[1] 刘孟楠,雷生辉,赵静慧,等.电动拖拉机发展历程与研究现状[J].农业机械学报,2022,53(增刊1):348-364.

- LIU Mengnan, LEI Shenghui, ZHAO Jinghui, et al. Development history and research status of electric tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 348–364. (in Chinese)
- [2] 邴坤, 刘元义, 宋发成, 等. 国内电动拖拉机研究现状[J]. 农业开发与装备, 2021(7): 22–23.  
BING Kun, LIU Yuanyi, SONG Facheng, et al. Research status of electric tractors in China [J]. Agricultural Development and Equipment, 2021(7): 22–23. (in Chinese)
- [3] 高辉松, 朱思洪, 吕宝占. 电动拖拉机发展及其关键技术[J]. 拖拉机与农用运输车, 2007, 34(6): 4–7.  
GAO Huisong, ZHU Sihong, LÜ Baozhan. Development of electric tractor and its key technology [J]. Tractor and Agricultural Transport Vehicle, 2007, 34(6): 4–7. (in Chinese)
- [4] MOREDA G P, MUÑOZ-GARCÍA M A, BARREIRO P. High voltage electrification of tractor and agricultural machinery—a review [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 115: 116–131.
- [5] UEKA Y, YAMASHITA J, SATO K, 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): 150–154.
- [6] D&D Motor Systems Inc. US electric ATV maker hopes to tap farmers market [EB/OR]. <http://www.ddmotorsystems.com/ATV-UtilityVehicleMotors.php>, 2014–07–17/2022–06–23.
- [7] FLORENTSEV S, IZOSIMOV D, MAKAROV L, et al. Complete traction electric equipment sets of electro-mechanical drive trains for tractors [C] // IEEE, 2010: 611–615.
- [8] Electric Vehicles Inc. Huge electric tractor—Fendt E100 Vario electric tractor [EB/OL]. <https://electricvehicles.in/huge-electric-tractor-fendt-e100/>, 2019–03–13/2022–06–23.
- [9] 王丽绵, 王书茂, 宋正河. 增程式电动拖拉机控制策略与启动方法研究 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 486–491.  
WANG Limian, WANG Shumao, SONG Zhenghe. Control strategy and startup method of extended range electric tractors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 486–491. (in Chinese)
- [10] 张宇. 小型电动拖拉机开关磁阻及多电机驱动与供电系统研究 [D]. 太原: 山西农业大学, 2018.  
ZHANG Yu. Research on switched reluctance and multi-motor drive and power supply system of small electric tractor [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [11] 张超, 朱思洪, 王军洋, 等. 太阳能园艺拖拉机驱动系统匹配设计与性能分析 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 24–30.  
ZHANG Chao, ZHU Sihong, WANG Junyang, et al. Matching design and performance analysis of drive system of solar garden tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 24–30. (in Chinese)
- [12] 汪珍珍, 周俊, 杨杭旭, 等. 电动拖拉机快速原型平台测控系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 412–420.  
WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, YANG Hangxu, et al. Design and test of measurement and control system for rapid prototype platform used in electric tractors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 412–420. (in Chinese)
- [13] 徐立友, 刘孟楠, 周志立. 串联式混合动力拖拉机驱动系统设计 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 11–18.  
XU Liyou, LIU Mengnan, ZHOU Zhili. Design of the drive train of a series hybrid tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(9): 11–18. (in Chinese)
- [14] 武仲斌, 刘宇, 张君, 等. 电动拖拉机动力电池压载构型设计与参数优化 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 425–433.  
WU Zhongbin, LIU Yu, ZHANG Jun, et al. Configuration design and parameter optimization of power battery ballast for electric tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 425–433. (in Chinese)
- [15] 赵静慧, 徐立友, 刘恩泽, 等. 增程式电动拖拉机驱动系统设计 [J]. 农机化研究, 2018, 40(11): 236–240.  
ZHAO Jinghui, XU Liyou, LIU Enze, et al. Design of drive system for extended-range electric tractor [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 236–240. (in Chinese)
- [16] 尹彦秋, 张俊深. 纯电动汽车驱动系统的技术现状与发展趋势 [J]. 内燃机与配件, 2021(16): 215–216.  
YIN Yanqiu, ZHANG Junshen. Technical status and development trend of pure electric vehicle drive system [J]. Internal Combustion Engine and Accessories, 2021(16): 215–216. (in Chinese)
- [17] WANG Y, ZHANG D, YANG L, et al. Modeling the interaction of soil and a vibrating subsoiler using the discrete element method [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174: 105518.
- [18] 温昌凯, 谢斌, 李若晨, 等. 拖拉机作业载荷数据平台设计与旋耕作业质量预测 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 372–381.  
WEN Changkai, XIE Bin, LI Ruochen, et al. Construction of tractor working load data platform and prediction of rotary tillage quality [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 372–381. (in Chinese)
- [19] 孙闫. 基于超级电容辅能的纯电动拖拉机能量管理的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2018.  
SUN Yan. Research on energy management of pure electric tractor based on super capacitor auxiliary energy [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [20] 刘大为, 谢方平, 叶强, 等. 1K–50型果园开沟机开沟部件功耗影响因素分析与试验 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 19–28.  
LIU Dawei, XIE Fangping, YE Qiang, et al. Analysis and test of factors affecting power consumption of ditching components of 1K–50 orchard ditching machine [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 19–28. (in Chinese)
- [21] 康建明, 李树君, 杨学军, 等. 基于多体动力学的圆盘式开沟机虚拟仿真与功耗测试 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(1):



57-63.

KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Virtual simulation and power test of disc type ditcher based on multi-body dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 57-63. (in Chinese)

- [22] 陈浩维. 浅谈永磁同步电机的技术优势及应用前景[J]. 内蒙古科技与经济, 2020(9): 81-82.  
CHEN Haowei. Talking about the technical advantages and application prospects of permanent magnet synchronous motors[J]. Inner Mongolia Science and Technology and Economy, 2020(9): 81-82. (in Chinese)
- [23] 张美迪. 电动汽车电池的现状与发展趋势[J]. 内燃机与配件, 2019(15): 230-231.  
ZHANG Meidi. Status and development trend of electric vehicle batteries[J]. Internal Combustion Engines and Accessories, 2019(15): 230-231. (in Chinese)
- [24] 李一, 王付胜, 杨淑英, 等. 基于浮动桥共中线开绕组拓扑的永磁同步电机矢量控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4942-4955.  
LI Yi, WANG Fusheng, YANG Shuying, et al. Research on vector control strategy of permanent magnet synchronous motor based on floating bridge common centerline open winding topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4942-4955. (in Chinese)
- [25] 王恩童, 刘宗锋, 卢纪丽, 等. 电动汽车锂电池自放电行为的温度特性[J]. 电源技术, 2019, 43(8): 1319-1321, 1347.  
WANG Entong, LIU Zongfeng, LU Jili, et al. Temperature characteristics of self-discharge behavior of electric vehicle lithium batteries[J]. Power Technology, 2019, 43(8): 1319-1321, 1347. (in Chinese)

(上接第 401 页)

- [23] ZHANG Y, LV C, WANG D, et al. A novel image detection method for internal cracks in corn seeds in an industrial inspection line[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 197: 106930.
- [24] KUSSUL N, LAVRENIUK M, SKAKUN S, et al. Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(5): 778-782.
- [25] ZHANG Z, GUO W, ZHU S, et al. Toward arbitrary-oriented ship detection with rotated region proposal and discrimination networks[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(11): 1745-1749.
- [26] ZHAI N. Detection using YOLO v5n and YOLO v5s with small balls[C]// International Conference on Computer Graphics, Artificial Intelligence, and Data Processing (ICCAID 2021). SPIE, 2022: 428-432.
- [27] TRINH H C, LE D H, KWON Y K. PANET: a GPU-based tool for fast parallel analysis of robustness dynamics and feed-forward/feed-back loop structures in large-scale biological networks[J]. PloS One, 2014, 9(7): 1-9.
- [28] NEUBECK A, VAN GOOL L. Efficient non-maximum suppression[C]// 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR06). IEEE, 2006: 850-855.
- [29] YANG X, YAN J. Arbitrary-oriented object detection with circular smooth label[C]// European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2020: 677-694.
- [30] HOU Q, ZHOU D, FENG J. Coordinate attention for efficient mobile network design[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2021: 13708-13717.
- [31] ZHENG Z, WANG P, LIU W, et al. Distance-IoU loss: faster and better learning for bounding box regression[C]// Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020: 12993-13000.
- [32] ZHOU J, JIANG P, ZOU A, et al. Ship target detection algorithm based on improved YOLO v5[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(8): 1-14.
- [33] MA J, SHAO W, YE H, et al. Arbitrary-oriented scene text detection via rotation proposals[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2018, 20(11): 3111-3122.
- [34] HOU L, LU K, XUE J, et al. Shape-adaptive selection and measurement for oriented object detection[C]// Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2022.
- [35] HAN J, DING J, LI J, et al. Align deep features for oriented object detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 5602511.
- [36] HAN J, DING J, XUE N, et al. Redet: a rotation-equivariant detector for aerial object detection[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2021: 2785-2794.