

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.047

纯电动拖拉机电驱动系统设计与试验

陈黎卿^{1,2} 詹庆峰^{1,2} 王伟伟^{1,2} 黄鑫^{1,2} 郑泉^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036)

摘要: 根据拖拉机工作特性与传动特性要求,设计了一种基于丘陵山区耕播工况下拖拉机电驱动系统,包括电驱动传动方案、驱动电机参数匹配、传动机构及动力输出机构特征参数设计等。在搭建的电驱动系统综合性能试验台上对该系统进行外特性、传动效率、噪声及可靠性测试。试验结果表明,该电驱动系统传动效率在72%~94%之间,且在1000 r/min以内低速工况下,能够稳定输出扭矩;在1000~3000 r/min之间能稳定输出功率。满足拖拉机耕播工况和运输工况下的特性要求,验证了电驱动系统设计的合理性。

关键词: 拖拉机; 电驱动系统; 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(2018)08-0388-07

Design and Experiment of Electric Drive System for Pure Electric Tractor

CHEN Liqing^{1,2} ZHAN Qingfeng^{1,2} WANG Weiwei^{1,2} HUANG Xin^{1,2} ZHENG Quan^{1,2}

(1. College of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Intelligent Agricultural Machinery and Equipment Engineering Laboratory, Hefei 230036, China)

Abstract: Traditional tractors have caused great problems in resources and environment. It is an urgent task to carry out the research of pure electric tractors. The electric drive system is the core of pure electric tractor. According to the tractor's working characteristics and transmission characteristics, a tractor electric drive system was designed based on hilly and mountainous area. It included the determination of electric drive transmission scheme, matching of driving motor parameters, design of characteristic parameters of the transmission mechanism and the power output mechanism, etc. And the Romax design analysis and strength checking of the transmission mechanism were also carried out. The fatigue design requirements met the analysis of bending stress, torque stress and damage degree of the axis. Finally, the system was tested for the external characteristics, transmission efficiency, noise and reliability on the electrically driven towing test bench built. The test results showed that the electric drive system can satisfy the characteristic requirements of the tractor tillage working condition, and it verified the rationality of the design of electric drive system. The transmission efficiency was 72%~94% under the low-running conditions of 1000r/min or less, the output torque can be stabilized; in the range of 1000~3000 r/min, the output power can be stabilized to meet the tractor's requirements under the cultivating conditions and transport conditions, which was better than that of the traditional fuel tractor. It proved that the electric drive system designed met the requirements. The electric drive system design laid a solid foundation for the development of subsequent electric tractors.

Key words: tractor; electric drive system; design; performance test

0 引言

近些年,纯电动拖拉机因其低能耗、无污染、噪声小、传动效率高等优点在生产中逐渐得以应

用^[1]。与传统燃油拖拉机相比,纯电动拖拉机因其能量来源于电机和蓄电池,要求驱动总成更加精确、效率更高^[2-4]。国内外专家研制了多款电动拖拉机并对其性能进行了研究^[5-7]。国内徐立友等^[8]提出

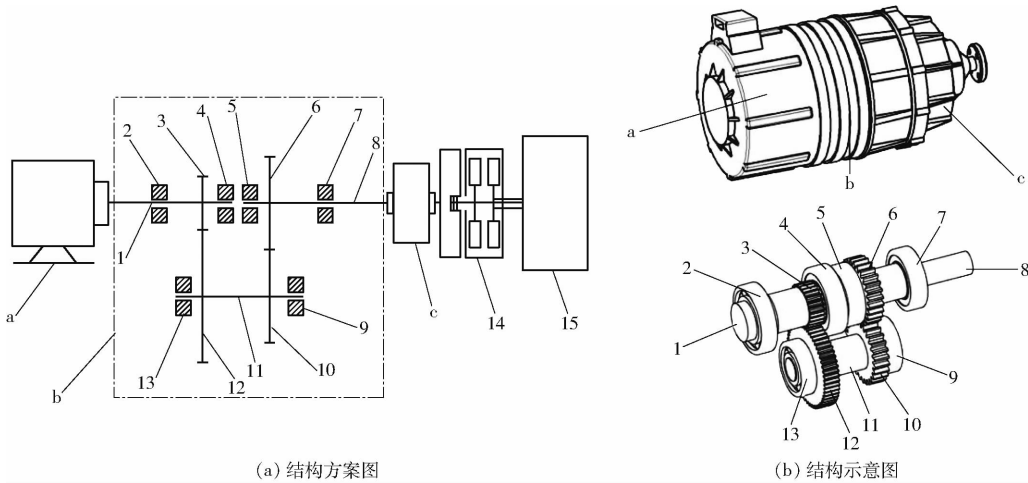
收稿日期: 2018-03-02 修回日期: 2018-05-27
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700902)和安徽省自然科学基金项目(1708085ME135)
作者简介: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士,主要从事智能农机装备设计研究,E-mail: lqchen@ahau.edu.cn
通信作者: 郑泉(1970—),女,教授,主要从事拖拉机传动系统研究,E-mail: zhengquan@ahau.edu.cn

一种串联式混合动力拖拉机驱动系设计方法。高辉松等^[9]对电动拖拉机驱动力特性及传动效率特性进行了试验研究。邓晓亭等^[10]设计了一种并联式混合动力拖拉机传动系统。谢斌等^[11]根据温室大棚作业需求,设计了一种小型电动拖拉机用的永磁直流无刷电机控制器。刘孟楠等^[12]在分析电动拖拉机控制器研究现状基础上,提出基于滑模变结构的无刷直流电机控制策略以达到稳定车速的目的。此外还有很多学者对电动拖拉机进行性能研究^[13-18]。综上所述,目前在混合动力拖拉机的驱动系统设计、控制系统以及性能分析等方面取得了较多研究成果,针对纯电动拖拉机动力系统设计以及特性分析还有待进一步深入研究。

本文以丘陵山区所用中小型拖拉机为研究对象,设计一套电驱动总成系统并对其进行性能试验。

1 驱动系统结构和工作原理

丘陵山区田块一般存在一定高度,拖拉机动力以中小型为主,从减轻动力传递系统的负重以及提高传递效率角度考虑,设计的纯电动拖拉机驱动系统改传统 4 轴传递结构为 3 轴式直连方式,如图 1 所示,主要包括电机、传动机构和动力输出部分。工作时永磁同步电机 a 经过传动机构 b 传递到动力输出部分 c,传动机构 b 是由 2 对齿轮和 3 根轴组成。



(a) 结构方案图

(b) 结构示意图

图 1 纯电动拖拉机电驱动系统

Fig.1 Drive system of electric tractor

1. 输入轴 2、4、5、7、9、13. 轴承 3. 一级主动齿轮 6. 二级从动齿轮 8. 输出轴 10. 二级主动齿轮
11. 中间轴 12. 一级从动齿轮 14. 离合器 15. 变速器

2 驱动系统关键部件设计

2.1 驱动电机匹配设计

拖拉机工作时主要受到滚动阻力、空气阻力、加速阻力、坡道阻力以及牵引阻力,如图 2 所示。考虑到主要设计对象是丘陵山区用拖拉机,需要考虑坡度阻力、滚动阻力和牵引阻力,因车速较慢忽略空气阻力和加速阻力^[19]。建立受力方程为

$$F_i = \sum F = F_f + F_i + F_T \tag{1}$$

- 其中 $F_f = mgf$
式中 F_f ——滚动阻力 F_i ——坡道阻力
 F_T ——牵引阻力
 m ——拖拉机质量
 g ——重力加速度,9.8 m/s²
 f ——滚动阻力系数,取 0.1

当拖拉机爬坡时,其坡道阻力为拖拉机沿坡道的分力,其计算公式为

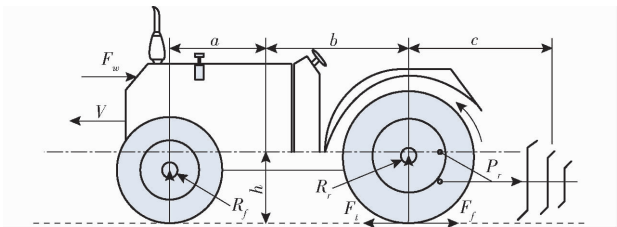


图 2 拖拉机正常行驶受力示意图

Fig.2 Force sketch of tractor with driving normal

$$F_i = mgsin\alpha + mgf\cos\alpha \tag{2}$$

式中 α ——最大坡度,取 45°

当拖拉机以最大速度在最大坡度自身行驶时,驱动力与滚动阻力和坡道阻力相平衡,不计牵引阻力,拖拉机可发挥最大驱动功率,根据额定功率一般为最大驱动功率的 0.5~0.7,计算公式为

$$P_{N1} = (0.5 \sim 0.7) P_{i1} \tag{3}$$

其中 $P_{i1} = F_f u_{max} + F_i u_{max} \tag{4}$

式中 P_{i1} ——拖拉机最大功率

P_{N1} ——拖拉机额定功率

$u_{\max}$ ——拖拉机最大行驶速度,取 20 km/h

电动拖拉机在耕地播种作业时,配套农具在耕作时受到土壤阻力作用,即牵引阻力作用。由文献[20]可得,牵引阻力与犁铧数、单犁铧宽度、耕深、土壤比阻等有关,即

$$F_T = zb_1h_kk \tag{5}$$

式中 z ——犁铧数,取 1

b_1 ——单犁铧宽度,取 20 cm

h_k ——耕深,取 16 ~ 20 cm

k ——土壤比阻,取 $4 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ Pa

犁地作业负荷重,考虑到因为工作环境以及农具的变化所带来的牵引阻力变化,额定牵引力必须大于牵引阻力,一般储备 10% ~ 20% 的牵引能力,即

$$F_{TN} = (1.1 \sim 1.2) F_T \tag{6}$$

式中 F_{TN} ——额定牵引力

电动拖拉机在进行耕作时的牵引功率计算公式为

$$P_{N2} = \frac{F_{TN}u_a}{3.6\eta_T\beta} \tag{7}$$

式中 P_{N2} ——牵引功率

u_a ——耕作速度,取 6 km/h

η_T ——牵引效率,取 90% ~ 95%

β ——功率储备系数,取 1.2

根据拖拉机在自身行驶下的功率需求以及农机具牵引功率要求,确定所需驱动电机的额定功率计算公式为

$$P_N = \beta(P_{N1} + P_{N2}) \tag{8}$$

式中 P_N ——驱动电机额定功率

根据以上公式结合丘陵山地中小型拖拉机参数等,确定驱动电机额定功率为永磁同步电机 25 kW,电机相关参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

Tab.1 Parameters of motor and controller

参数	数值/类型
型号	TZ200XSJH7
额定功率/峰值功率/kW	25/50
额定转速/峰值转速/(r·min ⁻¹)	3 500/7 200
最大扭矩/(N·m)	220
冷却方式	液冷
IP 等级	IP67
绝缘等级	H
工作制	S9
电压等级	380V DC

2.2 传动机构设计

由于电机与传动机构内部空间尺寸限制以及拖

拉机功率需求,确定传动机构减速比为 2,基于 Romax 软件构建动力学仿真模型如图 3 所示,模型中各传动轴所选材料为 45Cr,正火回火的弯曲疲劳极限为 235 MPa,扭转疲劳极限为 115 MPa^[21]。

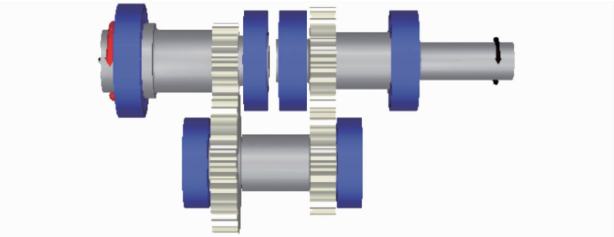


图 3 传动机构仿真模型

Fig.3 Romax model of drive axle

根据丘陵山地拖拉机工作工况和电驱动系统性能参数确定 3 种极限校核工况(表 2):①工况 1:额定功率及其对应转速时传动机构性能仿真。②工况 2:峰值功率及其对应转速时传动机构性能仿真。③工况 3:最大扭矩及其对应转速时传动机构性能仿真。经仿真后,各工况下传动轴所受极限弯矩应力和扭转应力如表 3 所示,其中在最大扭矩工况下输入轴、中间轴和输出轴所受应力如图 4 所示。

表 2 传动机构输入载荷

Tab.2 Input loads of drive axle

工况	输入转矩/(N·m)	转速/(r·min ⁻¹)	运行时间/h
1	68.21	3 500	30
2	66.31	7 200	15
3	220.00	2 170	15

表 3 极限工况下应力分析

Tab.3 Stress analysis of maximum working conditions

MPa

工况	输入轴		中间轴		输出轴	
	弯矩	扭转	弯矩	扭转	弯矩	扭转
	应力	应力	应力	应力	应力	应力
1	6.79	5.43	10.74	-10.86	8.07	25.73
2	6.60	5.28	10.45	-10.55	7.85	25.02
3	21.81	17.51	35.25	-35.02	25.87	83.00

由表 3 可知,工况 3 各传动轴所受应力最大,其中输出轴所受扭矩应力较大,达到 83 MPa,综合考虑所受弯曲应力,经计算得出在弯矩和扭矩共同作用下的安全因数为 1.35,符合强度要求。

由图 4 可知,图 4a 显示在距离轴左侧端面 83.33 mm 处(主动齿轮左侧端面)有最大弯曲应力 21.81 MPa;图 4b 中在距离中间轴左侧端面 117 mm 处(二级主动齿轮右侧端面)有最大弯曲应力 35.25 MPa;图 4c 中在距离轴左侧端面 26 mm 处(二级从动齿轮右侧端面)有最大弯曲应力 25.87 MPa;图 4d 中在距输入轴左侧端面 85 ~

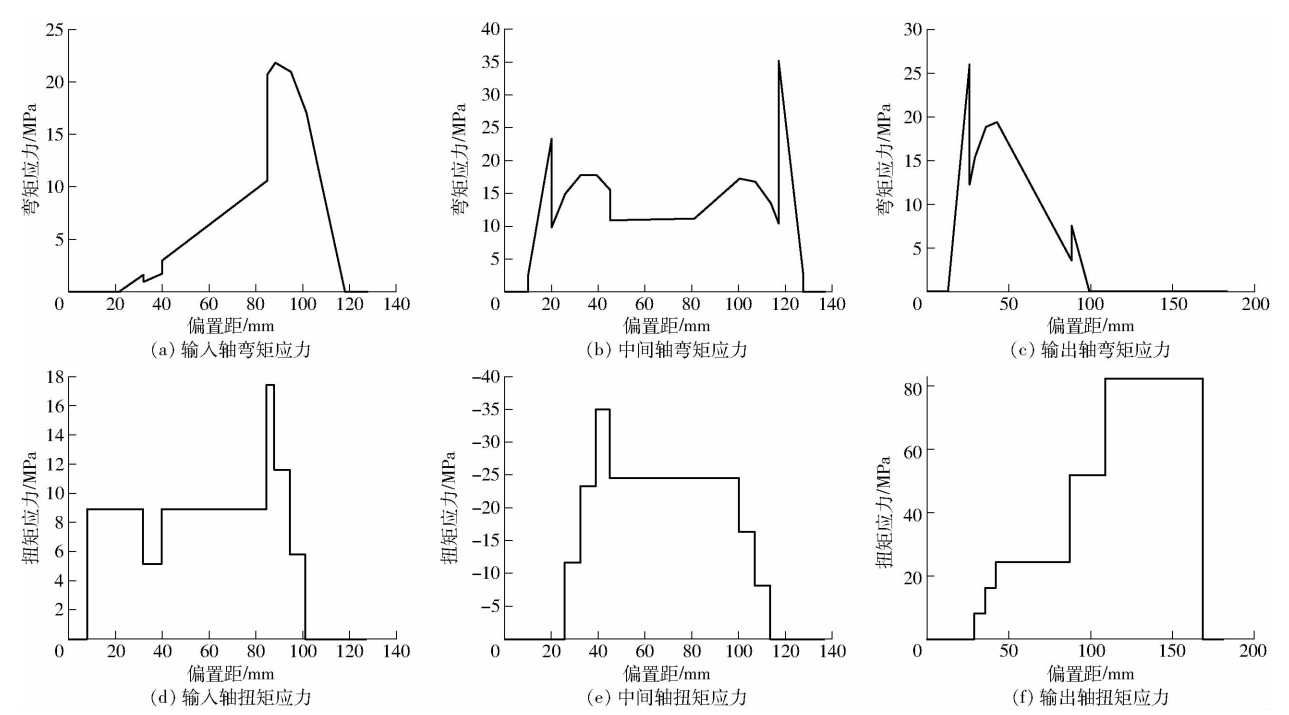


图 4 极限扭矩下各传动轴应力

Fig. 4 Maximum torque of stress of different axis

88.33 mm 处有最大扭矩应力 17.51 MPa;图 4e 中在距中间轴左侧端面 39.17 ~ 45 mm 处有最大扭矩应力 35.02 MPa,方向与输入轴相反。图 4f 中在距输出轴左端 110 ~ 170 mm 处有最大扭矩应力 83.00 MPa,方向与输入轴的相同。

对驱动轴运行所有载荷工况,运用迈因纳法则 (Miner's rules) 叠加损伤比,对轴承进行分析。图 5 为 3 种工况循环加载情况下不同轴承总的损伤百分比。

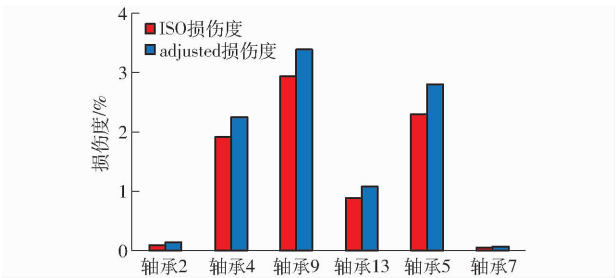


图 5 各级轴承 ISO 损伤度和 adjusted 损伤度

Fig. 5 ISO and adjusted damage of all levels of bearings

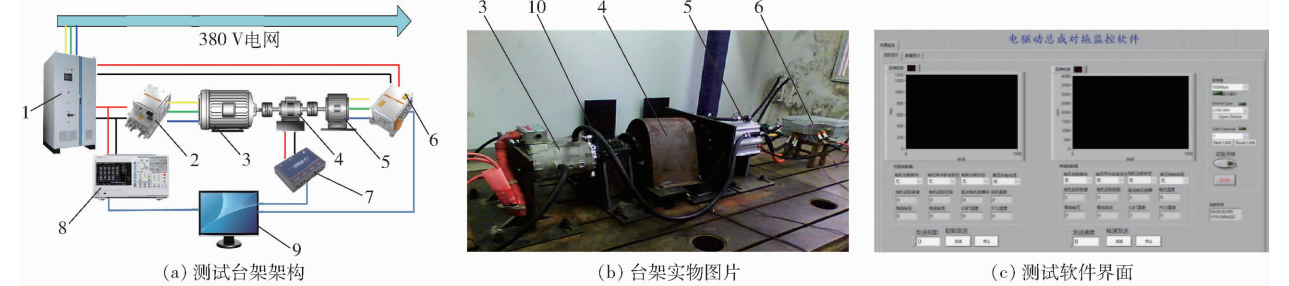


图 6 电驱动系统试验台架

Fig. 6 Electric drive system of experimental bench

1. 双向直流电源 2,6. 控制器 3. 电驱动系统 4. 扭矩传感器 5. 对拖加载电机系统 7. 采集卡 8. 功率分析仪 9. 控制台 10. 冷却循环系统

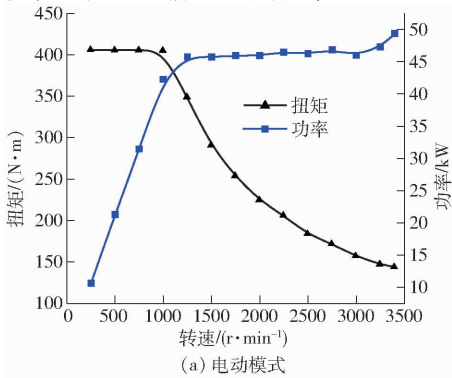
永磁同步电机,通过速度、扭矩闭环对被测总成加载速度,电参数采集系统对负载系统加载扭矩,通过电流互感器和功率分析仪监测电驱动总成的输入电功率,速度传感器、扭矩传感器和监测电驱动总成的输出机械功率。性能测试系统部分部件参数如表 4 所示。

表 4 部分部件规格参数
Tab.4 Parameters of some parts

名称	型号	性能参数
直流电源	EVD-80-800	高精度:输出电压精度 0.1% FS 高动态特性:10%~90% 突加载输出 电压响应时间不大于 5ms, -90%~ 90% 切换时间不大于 10 ms
功率分析 仪	PA2000mini	通道:4 功率通道 基本精度:0.1% 输入带宽:DC,0.1 Hz~500 kHz
水冷散热 设备		温度保持范围:设定值 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 系统冷却功率:15 kW
扭矩传感 器	美国 PCB- 5308D-01A	扭矩量程:0~10 000 Lb-in 扭矩信号:5~15 kHz 转速量程:0~10 000 r/min 精度: $\pm 0.01\%$ 频率响应:100 μs
速度传感 器	JX71Z-M16*1- 50-30k	扭矩输入:5~15 kHz 转速量程:0~5 000 r/min 数据输出:0~5 V 供电方式:8~24 V DC

驱动电机与负载电机加载系统:由驱动电机控制器、驱动电机、负载电机控制器、负载电机(某中型公交车电机)、上位机组成。负责给驱动电机加载速度、给负载电机加载扭矩。

检测传感系统:由噪声传感器、电流互感器、功率分析仪、速度传感器、扭矩传感器、NI 机箱和上位机组成。电流互感器和功率分析仪主要采集驱动电机的输入电功率,速度传感器、扭矩传感器、NI 机箱和上位机主要采集驱动电机输出机械功率。



3.2 性能测试分析

性能试验主要包括外特性、传动效率、噪声和可靠性试验等。

3.2.1 外特性试验

图 7 为电驱动系统外特性曲线。由图 7a 可得,1 000 r/min 转速是个拐点。当转速在 250~1 000 r/min 时,扭矩稳定输出,符合拖拉机在低速以及爬坡等情况下的动力输出要求,最大扭矩达到 408.46 N·m。当转速在 1 000~3 000 r/min 时,功率输出稳定,最大功率达到 49.36 kW,此时符合拖拉机在高速时以及用于运输等情况特点。发电模式下也具有相同特点。

3.2.2 传动效率试验

电驱动系统传动效率 MAP 曲线如图 8 所示。由图 8a 可知,电驱动效率在 72%~94% 之间,其中在正常工作范围内效率均在 90%;最高效率点为:效率 93.81%,此时转速 1 491 r/min,扭矩 168.48 N·m,功率 26.3 kW。通过进一步分析可得系统的传动效率大于 80% 占 95.19%。由图 8b 可知,发电效率在 70%~95% 之间。最高效率点为:效率 94.14%,此时转速 1 268 r/min、扭矩 160.02 N·m、功率为 21.24 kW;效率大于 80% 占 97.19%。

3.2.3 噪声试验

电驱动系统噪声测试结果如图 9 所示,环境噪声为 67.83 dB,随着转速增加,电驱动系统噪声数值整体呈上升趋势,当达到最高输出转速 3 600 r/min 时,有最大噪声 101.24 dB;在 500~1 000 r/min 噪声在 95 dB 以内,在 1 000~3 500 r/min 噪声基本稳定在 100 dB 以内,符合设计要求。

3.2.4 可靠性试验

为了验证设计的驱动系统可靠性,按照以下工况进行可靠性试验,并对试验前后的性能进行对比,如图 10 所示。

由图 10a 可知,按照变工况进行设计可靠性试

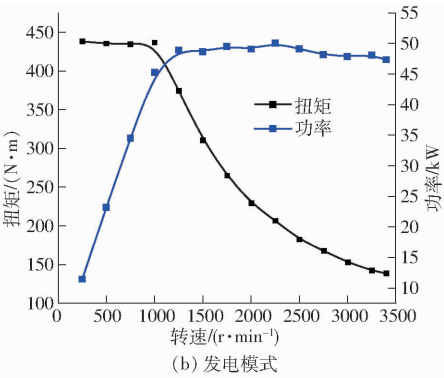


图 7 电驱动系统外特性曲线

Fig.7 External characteristics curves of electric drive system

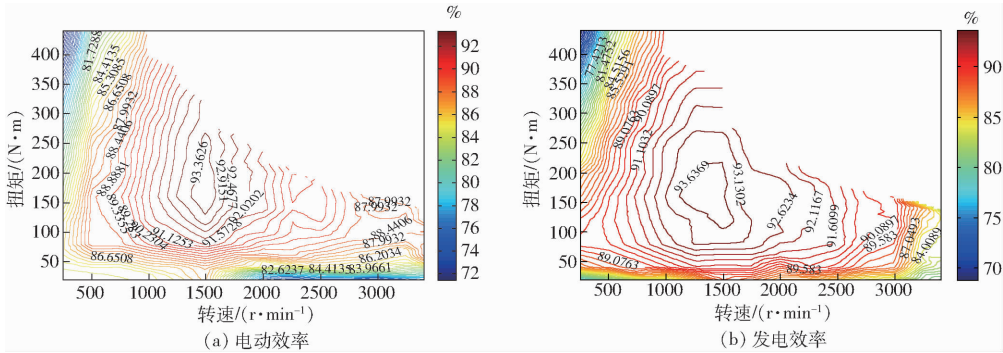


图 8 电驱动系统传动效率图

Fig. 8 Transmission efficiency diagrams of electric drive system

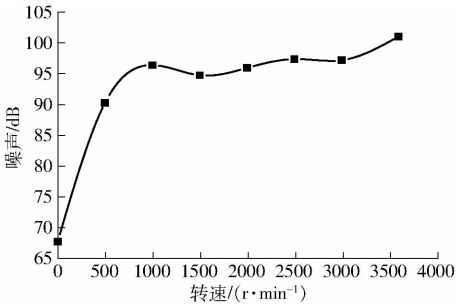


图 9 电驱动系统噪声曲线

Fig. 9 Noise curve of electric drive system

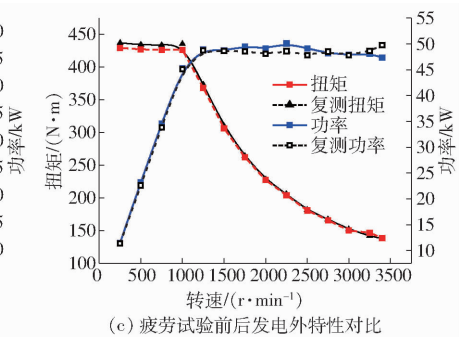
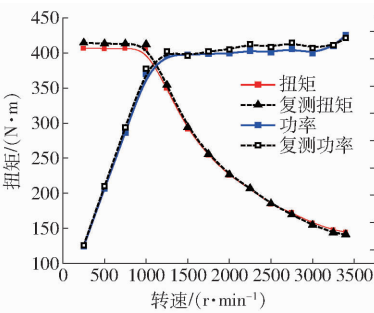
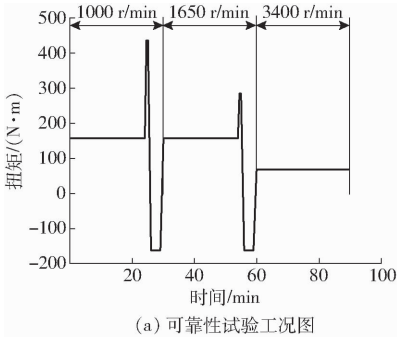


图 10 电驱动系统可靠性试验

Fig. 10 Reliability experiment of electric drive system

80% 占 96.89% ; 大于 85% 占 89.62% 。复测发电模式下最高效率点: 效率 94.49% , 此时转速 1 745 r/min , 扭矩 120.81 N · m 。效率大于 80% 占 97.62% ; 大于 85% 占 93.09% 。与疲劳耐久试验前的电动效率和发电效率差别很小。

4 结束语

根据丘陵山区中小型拖拉机使用特点以及电动

验, 每周期共耗时 90 min , 对电驱动系统进行连续不间断 180 h 工况循环的可靠性试验。

由图 10b 可知, 耐久复测后, 当转速为 250 r/min , 可达最大输出扭矩 414.52 N · m 。当转速为 3 400 r/min , 输出峰值功率 48.81 kW 。与耐久试验前数据相差很小, 电驱动系统电动外特性曲线与疲劳前试验曲线几乎重合, 疲劳耐久试验后, 外特性性能保持良好。

复测电动模式下, 最高效率点: 效率 94.15% , 此时转速 1 491 r/min , 扭矩 200.16 N · m 。效率大于

拖拉机的设计要求, 提出一种三轴直连式电驱动系统, 详细阐述了驱动电机匹配和传动机构等部件的设计; 通过搭建的纯电动拖拉机电驱动系统性能试验台, 对该电驱动系统进行外特性、传动效率、噪声和可靠性试验。试验结果表明, 所设计的电驱动系统结构合理、可行, 为后续纯电动拖拉机的研发打下了坚实的基础。

参 考 文 献

1 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.

2 付明亮, 丁焰, 尹航, 等. 实际作业工况下农用拖拉机的排放特性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6) : 42 - 48.

FU Mingliang, DING Yan, YIN Hang, et al. Characteristics of agricultural tractors emissions under real-world operating cycle[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6) : 42 - 48. (in Chinese)

3 张铁民, 闫国琦, 温利利, 等. 我国电动力农业机械发展现状与趋势[J]. 农机化研究, 2012, 34(4) : 236 - 240.

ZHANG Tiemin, YAN Guoqi, WEN Lili, et al. Current situation and development of electric agricultural machinery in China[J].

- Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(4): 236–240. (in Chinese)
- 4 郭世荣,孙锦,束胜,等. 国外设施园艺发展概况、特点及趋势分析[J]. 南京农业大学学报,2012,35(5):43–52.
GUO Shirong, SUN Jin, SHU Sheng, et al. General situation, charactics and trend of protected horticulture in foreigners[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2012, 35(5): 43–52. (in Chinese)
- 5 DE CASTRO R P, OLIVEIRA H S, SOARES J R, et al. A new FPGA based control system for electrical propulsion with electronic differential[J]. Power Electronics and Applications,2007,5(2):1–10.
- 6 CHEN Yanni, XIE Bin, MAO Enrong. Electric tractor motor drive control based on FPGA[J]. IFAC-Papers On Line,2016, 49(16):271–276.
- 7 HOSSEIN M, ALIREZA K, ARZHANG J, et al. Evaluation of alternative battery technologies for a solar assist plug-in hybrid electric tractor[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment,2010,15(8):507–511.
- 8 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)
- 9 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):40–43,58.
GAO Huisong, WANG Shanshan, ZHU Sihong. Experiment on characteristics of driving force and transmission efficiency of electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(10):40–43,58. (in Chinese)
- 10 邓晓亭,朱思洪,高辉松,等. 混合动力拖拉机传动系统设计理论与方法[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(8):24–31,36.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120805&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.005.
DENG Xiaoting, ZHU Sihong, GAO Huisong, et al. Design theory and method for drive train of hybrid electric tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(8):24–31,36. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 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. 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.
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. (in Chinese)
- 13 刘孟楠,周志立,徐立友,等. 基于多性能目标的拖拉机运输机组优化设计[J]. 农业工程学报,2017,33(8):62–68.
LIU Mengnan, ZHOU Zhili, XU Liyou, et al. Multi-objective optimization and design of tractor trailer systems[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 62–68. (in Chinese)
- 14 鲁植雄,侯辛奋,邓晓亭. 串联式混合动力拖拉机驱动系统设计匹配与牵引试验[J]. 南京农业大学学报,2017,40(5):928–935.
LU Zhixiong, HOU Xinfen, DENG Xiaoting. Matching design and traction tests for driving system of series hybrid electric tractor [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2017,40(5):928–935. (in Chinese)
- 15 伊力达尔·伊利亚斯,朱思洪,徐刚,等. 拖拉机前桥悬架参数匹配及其对振动特性的影响[J]. 农业工程学报,2015, 31(10):29–36.
YILIDAER·Yiliyasi, ZHU Sihong, XU Gang, et al. Front axle suspension parameters match and its impact on vibration characteristics of tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 29–36. (in Chinese)
- 16 王元杰,刘永成,杨福增,等. 温室微型遥控电动拖拉机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(22):23–29.
WANG Yuanjie, LIU Yongcheng, YANG Fuzeng, et al. Development and test of tiny remotely controlled electric tractor for greenhouses[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 23–29. (in Chinese)
- 17 谢斌,张超,陈硕,等. 双轮驱动电动拖拉机传动性能研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(6):8–13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150602&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.002.
XIE Bin, ZHANG Chao, CHEN Shuo, et al. Transmission performance of two-wheel drive electric tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(6):8–13. (in Chinese)
- 18 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 miniature electric tractor[J]. Journal of Machine Design, 2013,30(3):82–85. (in Chinese)
- 19 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 for driving system of solar garden tractor[J]. Transactions of the CSAE,2015, 31(11): 24–30. (in Chinese)
- 20 高辉松. 电动拖拉机驱动系统研究[D]. 南京:南京农业大学,2008.
GAO Huisong. Researches on drive system of electric tractor[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2008. (in Chinese)
- 21 李强,夏权,郑泉,等. 基于 Romax 的分时4驱汽车用分动器力学特性分析[J]. 汽车技术,2016(3):45–49.