

小型履带自走式电动多功能作业平台的设计及试验

吴永栓¹, 孙晨阳¹, 周学剑², 於锋², 周俊^{1*}

(1.南京农业大学工学院, 江苏 南京 210031; 2.江苏省农机具开发应用中心, 江苏 南京 210017)

摘 要: 针对传统小型拖拉机(功率低于 10 kW)采用内燃机轮式驱动, 排放污染大、环境适应性较差、作业功能单一等问题, 研制了一款履带自走式电动多功能作业平台, 通过搭载旋耕和起垄机具完成田间作业。平台主要由电机、电池箱、变速箱、履带底盘、座椅、悬挂机构、操纵机构、PTO 输出等组成; 电动机输出轴将动力传递到变速箱输入轴, 调节变速箱档位, 改变平台前进速度, 作业过程电机保持恒速运转, 使 PTO(动力输出装置)转速恒定, 保证平台平稳作业。主要对传动系统、动力参数、履带行走机构进行了设计。确定电机型号 XQ-7.5-6, 额定功率 7.5 kW, 功率储备系数 20%; 传动系统包含 3 个前进档和 1 个倒退档; 履带宽度 230 mm, 节距 72 mm, 轨距 650 mm。旋耕及起垄试验结果表明: 旋耕平均耕宽 86.4 cm, 平均耕深 16.9 cm; 起垄平均垄顶宽 42.4 cm, 平均垄底宽 82.7 cm, 平均垄高 26.8 cm; 作业过程中, 电机转速在平均转速的 7%~10%波动, 平台运行平稳, 动力输出均匀; 选择功率储备系数 20%, 能够满足小型拖拉机旋耕、起垄作业需求。

关 键 词: 履带自走式电动作业平台; 参数设计; 多功能

中图分类号: S219.4 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2019)06-0664-05

Design and test of the small size crawler-type self-propelled electric multifunctional operation platform

WU Yongshuan¹, SUN Chenyang¹, ZHOU Xuejian², YU Feng², ZHOU Jun^{1*}

(1.College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210031, China; 2.Development and Application Center of Agricultural Machinery in Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210017, China)

Abstract: We have developed a crawler-type self-propelled electric multifunctional platform to solve the problems of traditional small tractor (power < 10 kW) as followed: unreasonable selection of kinetic parameter, machinery emission, poor environmental adaptability of wheel drive, single platform function. The platform mainly consists of motor, battery box, gearbox, crawler chassis, seat, linkage, control mechanism, and PTO output. The output shaft of the motor transfers power to the input shaft of the gearbox. During working, the forward speed of the platform are adjusted by changing the gear of the gearbox, and the motor maintains a constant speed operation to keep the speed of the power take off constant and ensure the stable operation of the platform. We have designed the transmission system, power parameters and crawler mechanism. The parameters are determined as followed: the motor model of XQ-7.5-6 with the rated power of 7.5 kW and the power reserve coefficient of 20%; the transmission system includes 3 forward gears and 1 reverse gear; the crawler with the width of 230 mm, the pitch of 72 mm, and the track gauge of 650 mm. Rotary tillage and ridging test results showed that the average tillage width was 86.4 cm with the average tillage depth of 16.9 cm, and the average width of ridge top is 42.4 cm with the average width of ridge bottom being 82.7 cm and the average ridge height of 26.8 cm. The motor speed fluctuates within the range of 7% - 10% of the average speed, and the platform operates stably and the power output is even. The motor and reserve power coefficient of 20% meets the rotary farming and ridging operation requirements of small tractors.

Keywords: the small size crawler-type self-propelled electric multifunctional operation platform; parametric design; multifunctional

截至 2016 年底,江苏省农机总动力达到 $4.907 \times 10^7 \text{ kW}^{[1]}$,以每月工作 200 h 估算,全省使用农机每年消耗 253.20 万 t 柴油,排放污染已经严重危害环境。而使用纯电动农业机械可以较好地解决这一系列问题^[2-3]。高辉松等^[4-5]提出了一套电动拖拉机性能评价指标以及电驱动系统参数设计理论及计算方法,对驱动系统进行了仿真研究,开发了电动拖拉机试验台,对新开发的电动拖拉机各项性能指标进行测试,并研制了一种适用于设施农业环境的电动微耕机^[6],该机在耕作效率和经济性方面优于同功率的汽油微耕机;李汝莘等^[7]研制并优化了一种温室电动松土机,采用曲柄摇杆松土机构,模拟人工刨土的运动特征,切土和翻土性能较好,结构简单,操作方便,适合在空间狭小的棚室内作业,能较好地解决温室耕作问题;杨福增等^[8]研制一种微型遥控电动拖拉机,作业效率为 $720 \text{ m}^2/\text{h}$,连续作业时间可达 2.5 h,作业能耗成本约为 $14.4 \text{ 元}/\text{hm}^2$,适用于温室和大棚特殊环境的作业要求,但作业功能单一,无法适应多种作业需求;杨福增等^[9]设计了一种温室双电源电动拖拉机,但对温室设施化程度要求高,现阶段仍然不适用国内温室,在设计时提出选取功率储备系数 10%~20%,但未在后期试验中验证其准确性;陈黎卿等^[10]完成了纯电动拖拉机电驱动系统设计,为电动拖拉机的设计提供了一定的参考,设计选取功率储备系数为 20%,但未进行进一步说明,无法判断选取的准确性。

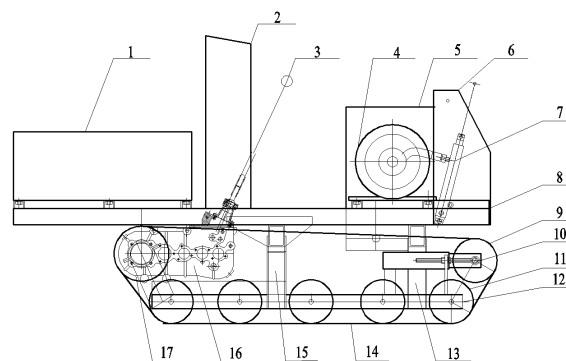
笔者结合旱田整地、田园管理及设施农业等耕耘作业需求,根据现有机具设备的结构、功能特点^[11-18]及存在的问题,设计了一种小型履带自走式电动多功能作业平台,替代传统小型拖拉机,确定电机型号,功率储备系数,履带节距,履带宽度,履带接地宽度等参数,并进行了旋耕、起垄作业性能的测试。

1 作业平台的结构及工作原理

根据旱田整地、田园管理及设施农业等耕耘作业需求,设计了小型自走式多功能作业平台,通过悬挂旋耕机、起垄机等完成田间作业。

小型自走式电动多功能作业平台主要由电机、蓄电池箱、变速箱、履带底盘、座椅、悬挂机构、操纵机构、PTO 输出等组成,如图 1 所示。因平台需要悬挂不同类型的农具,考虑到重心位置以及

作业行驶的平稳性、整机的协调性,确定电池箱、变速箱摆放在平台的前部,电池箱由保护装置进行安全保护;电机和座椅置于平台的后部,座椅摆放在电机的上侧,对电机起保护作用;悬挂机构置于平台的尾部,用来悬挂不同类型的作业机具。



1 电池箱;2 仪表盘;3 操纵机构;4 电机;5 座椅;6 悬挂机构;7 PTO 输出;8 底盘支架;9 导向轮;10 导向轮支架;11 从动轮;12 从动轮支架;13 后腿;14 履带;15 前腿;16 变速箱;17 主动轮。

图 1 作业平台的结构

Fig.1 Structure of work platform

平台工作时,蓄电池提供动力,通过电动机输出轴传递至变速箱输入轴,调节变速箱档位,改变平台前进速度;前进过程中,电机基本保持恒速运转,以保证恒转速的 PTO(动力输出装置)动力输出,从而使平台平稳作业。

2 关键部件的设计及其主要参数的选取

2.1 动力系统

平台采用电机驱动。由于现阶段电机选取尚无参考标准,因此对电机的选型、电机储备功率进行了设计计算。

平台主要用于旋耕、起垄、铺膜、犁耕、运输等作业,其中旋耕的功耗最大,因而以旋耕作业的动力需求来确定电机的最大功率。依据文献[19],电动旋耕机作业时消耗的功率,即刀具旋耕作业消耗的功率与行走消耗的功率之和。当旋耕深度 15 cm、机具作业前进速度 0.3 m/s、作业幅宽 0.85 m 时,旋耕所消耗功率为 4.18 kW。

履带自走式电动多功能作业平台目标作业场地以平地为主,仅在更换作业场地和换垄时需要少量的爬坡,因此,以平台最大速度爬坡所需功率作为机具前进的最大功率,依据文献[20],机具行走的最大功率为 1.8 kW。

综上,确定平台消耗总功率为 5.98 kW。考虑到极限工况和摩擦、老化等会使平台所需功率和转矩突然升高,在选择电机时需要保留一定的储备功率。参考内燃机功率储备系数的选择方法^[18],选取电机功率储备系数为 20%,最终确定电机功率为 7.18 kW,而根据市场现有的电机型号,选定电机功率为 7.50 kW。因平台工作时的起动转矩大,直流串励电机可能在不太大的过载电流下,产生较大的过载转矩,选择该类型电机可以很好地适应这种工况;选定直流串励电机型号为 XQ-7.5-6,功率为 7.50 kW。

根据动力系统计算结果,估算作业时电机的输出功率为 3~6 kW,因此选取 5 kW 为平台作业所需要的平均功率,并以此功率计算所需电池的容量。电机的额定电压为 72 V,则电机工作时的电流 69.44 A。为保证机具有不少于 2 h 的续航时间,电池的理论最小容量应为 138.89 A·h,综合续航时间和成本、质量等因素,选定电池容量为 200 A·h。

2.2 传动系统

平台工作时,既可以作为运输车辆,又能够作为作业机具的负载底盘并为其提供动力,因此平台的传动系统可分为两大部分:第一部分将动力传递给行走系统;第二部分将动力传递至负载的作业机械。传动系统需要综合考虑传动要求,选择经济、可靠的传动方案。传动路线如图 2 所示。

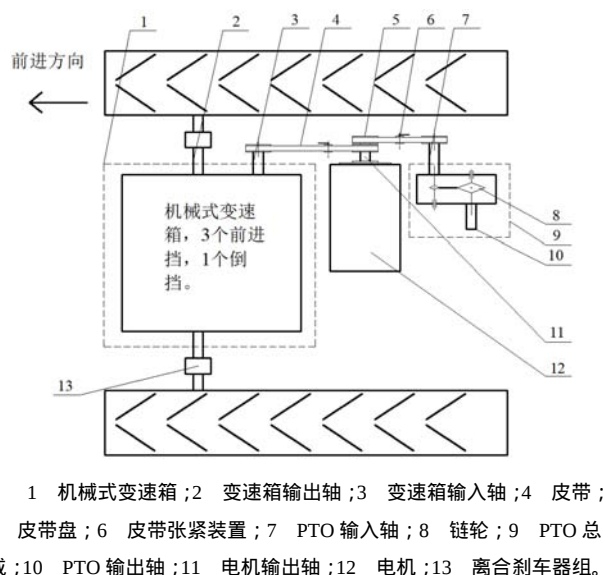


图 2 动力系统的传递路线

Fig.2 Transmission route of power system

电机启动后,通过皮带张紧装置调节皮带松紧,实现动力的结合与断开。一部分动力由皮带传递至变速箱,调节变速箱档位,改变机具的前进速度,实现前进和倒退;转向时调节离合刹车器组,实现动力切断,同时进行制动,保证平台可以快速转向、原地转向。另一部分动力由皮带传递至 PTO 输出总成,通过链轮装置减速增矩,保证恒速的 PTO 输出。

2.3 履带行走装置

履带行走装置主要由主动轮、前腿、底盘支架、后腿、导向轮、履带、从动轮支架、从动轮等组成(图 3)。行驶过程中,主动轮通过轮齿和履带的啮合将履带卷起。当前进的驱动力大于行走阻力时,车辆向前行驶。

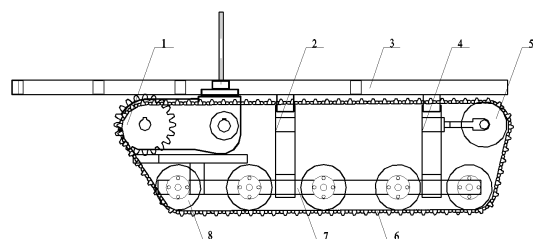


图 3 履带行走装置的结构

Fig.3 Structure of crawler traveling device

根据作业环境特点及履带底盘的设计要求,履带的接地长度的合理选取能使平均接地比压、附着性能满足要求,提高底盘的通过性。依据文献[21],确定履带节距为 72 mm,履带宽度为 230 mm,履带接地长度为 1 000 mm。

驱动轮用以承载发动机输出的动力,将动力传递给履带。驱动轮和履带的啮合质量影响动力的传递和行驶的均匀性。履带驱动轮前置时,电机布置在履带底盘的前方,可以大大简化操纵机构,降低整车的成本,因而采用前轮驱动。导向轮用于引导履带的正确绕转,只在上坡或翻越沟壑时承载底盘的部分质量,同时起张紧履带装置的作用,使履带行走体系行驶可靠。根据整体结构,计算确定驱动轮直径为 200 mm、导向轮直径为 160 mm、轨距为 650 mm。

确定平台的主要技术参数列于表 1。

表 1 平台主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of the platform	
参数	取值
平台(裸机)设计最大长度/mm	2 100
平台(裸机)设计最大宽度/mm	880
平台(裸机)设计最大高度/mm	1 350
平台(裸机)设计最大质量/kg	300
履带宽度/mm	230
履带节距/mm	72
履带节数	43
电池电压/V	72
电池容量/A·h	200
电机类型	直流串励电机
电机功率/kW	7.5
功率储备系数	20%
变速箱类型	有级变速箱
变速箱档位数	3+1

3 平台的田间运行测试

于 2018 年 10 月在江苏无锡华源凯马发动机有限公司进行整机性能测试。试验场地选择蔬菜种植区,测得 10 cm 和 20 cm 深度的土壤坚实度分别为 81 N/cm² 和 113.2 N/cm², 含水率分别为 8.7% 和 19.2%。

对平台的旋耕、起垄性能进行测试,同时对电机选型、功率储备系数选取的合理性和平台作业稳定性进行验证。

3.1 旋耕试验

专业人员驾驶作业平台,沿直线匀速行驶,作业长度 20 m,重复 2 次。旋耕后取 5 个测量点测量耕宽、耕深,结果旋耕平均耕宽 86.4 cm,平均耕深 16.9 cm。作业过程中,机具行进平稳,平均作业时长为 100.5 s,机具前进平均速度为 0.2 m/s,作业时的碎土率以及耕宽、耕深均符合设计要求,满足小型拖拉机的田间作业要求。传感器实时测量,电机平均电压为 72 V,电流为 67 A,转速为 1 814.2 r/min,输出功率为 4.833 9 kW。

电机的平均输出功率,电机工作时的平均电流与估算值相差小。进一步分析旋耕试验电机的电流和输出功率(图 4),输出功率 3.657 6~7.20 kW,最大转速 2 200 r/min,低于电机最大转速 3 200 r/min,平均转速与电机的额定转速 1 600 r/min 相近,电机在旋耕过程输出的最大功率为 7.20 kW,低于 7.5

kW,与设计计算的旋耕所需的理论最大功率 5.98 kW 相差 1.22 kW,与选取的 20% 储备功率系数相吻合。表明选取的电机功率、储备功率系数较为准确。旋耕试验转速标准差分别为 143.62 r/min、137.81 r/min,转速在平均转速的 7%~9% 波动,平台运行平稳及动力输出均匀。

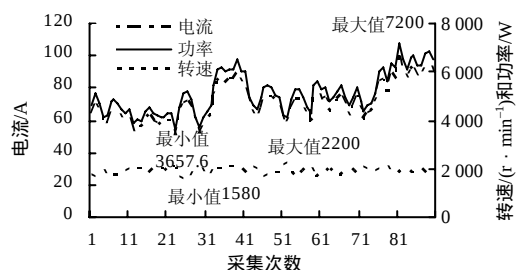


图 4 旋耕的电流和转速及输出功率

Fig.4 Current, rotational speed and output power in rotary tillage test

3.2 起垄试验

起垄试验以旋耕后起垄和直接起垄 2 种方式进行。专业人员驾驶作业平台,沿直线匀速行驶,作业长度 20 m,起垄后取 5 个测量点,测量垄顶宽、垄底宽、垄高。旋耕后起垄平均垄顶宽 41.9 cm,平均垄底宽 82.3 cm、平均垄高 31.2 cm;直接起垄平均垄顶宽 42.4 cm,平均垄底宽 82.7 cm,平均垄高 26.8 cm。

2 种起垄方式的垄顶宽、垄底宽基本相同,但直接起垄的垄高明显高于旋耕后起垄的;旋耕后起垄作业时长为 100 s,平均前进速度为 0.2 m/s,直接起垄作业时长为 110 s,平均前进速度为 0.18 m/s。通过传感器实时测量,旋耕后起垄,电机电压 72 V,电机电流 44.5 A,电机转速 1 840.0 r/min,输出功率 3.202 9 kW;直接起垄,电机电压 72 V,电机电流 74.1 A,电机转速 1 815.9 r/min,输出功率 5.333 5 kW。

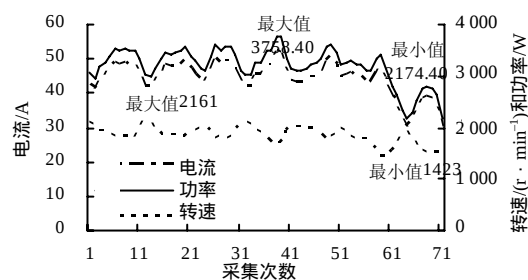


图 5 旋耕后起垄的电流和转速及输出功率

Fig.5 Current, rotational speed and output power in ridging test after rotary tillage

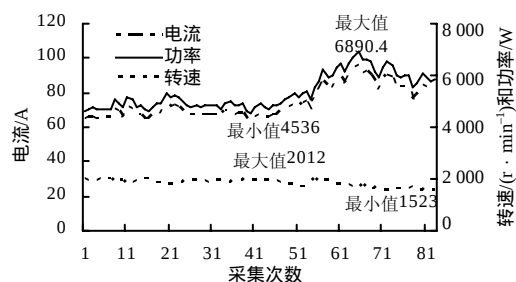


图 6 直接起垄的电流和转速及输出功率

Fig.6 Current, speed and output power in direct ridging test

直接起垄消耗的平均功率是旋耕后起垄消耗的平均功率的 1.7 倍。分析图 5 和图 6, 旋耕后起垄的电机转速、功率波动较大, 电机在低功率输出状态下工作, 工作状况不稳定; 直接起垄, 则电机转速、功率波动小, 工作状况稳定。对比 2 种起垄方式, 旋耕后起垄和直接起垄作业用时 100~110 s, 都可以满足田间作业需求, 但直接起垄耗能更低。起垄试验转速标准差分别为 168.1 r/min、132.6 r/min, 转速在平均转速的 7%~10% 波动, 平台运行平稳及动力输出均匀。

参考文献:

- [1] 黄秉信. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [2] TERESA D, ASCLEPIO NICOLAZZO. Preliminary design of a hybrid electric powertrain for a earthmoving machine[J]. Energy Procedia, 2018, 148: 495-502.
- [3] 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.
- [4] 高辉松. 电动拖拉机驱动系统研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [5] 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.
- [6] 高辉松, 朱思洪, 史俊龙, 等. 温室大棚用电动微耕机研制[J]. 机械设计, 2012, 29(11): 83-87.
- [7] 孟伟, 李明利, 李汝莘. 温室电动松土机的研制[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2009, 40(2): 269-272.
- [8] 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.
- [9] 李旭光. 温室双电源电动拖拉机的研制与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [10] 陈黎卿, 詹庆峰, 王韦韦, 等. 纯电动拖拉机电驱动系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 388-394.
- [11] 陈震邦, 周莹. 农用电动运输车设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 153-154, 157.
- [12] 杜发荣, 吴志新. 电动汽车传动系统参数设计和续航里程研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(11): 9-11, 44.
- [13] 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 1-18.
- [14] 赵思夏, 刘孟楠, 徐立友. 电动拖拉机底盘多目标优化设计[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊 1): 492-498.
- [15] 赵润华, 吴彦强, 刘中正, 等. 温室电动微耕机的设计[J]. 山东农业科学, 2015, 47(2): 129-131.
- [16] 郭晨星. 电动微耕机的分析与设计研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [17] 阳帅, 蒋蘋, 胡文武, 等. 履带式拖拉机可视遥控驾驶系统的设计及试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(5): 561-566.
- [18] 曾百功, 叶进, 杨仕, 等. 微耕机土壤耕作部件田间测试平台的研制[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(4): 456-459.
- [19] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[K]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 177.
- [20] 周一鸣. 汽车拖拉机理论[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000.
- [21] 赵子涵, 穆希辉, 郭浩亮, 等. 橡胶履带轮静态接地压力测试与建模[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 72-79.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立