

双轮驱动电动拖拉机传动性能研究*

谢斌 张超 陈硕 毛恩荣 杜岳峰

(中国农业大学工学院,北京 100083)

摘要:提出了双轮驱动电动拖拉机的总体结构方案,从作业受力和牵引效率2个方面分析了电动拖拉机的牵引性能,并进行了传动部件的匹配分析。在此基础上搭建了电动拖拉机传动试验平台,分别进行了牵引性能、带载启动及运输工况等试验。试验结果表明,所设计的电动拖拉机牵引转矩达到 $1\ 800\ \text{N}\cdot\text{m}$,可满足更大耕深作业。带载启动时,驱动转矩从 $700\ \text{N}\cdot\text{m}$ 增至 $1\ 600\ \text{N}\cdot\text{m}$,车速由0增至 $7\ \text{km/h}$,所用时间约为 $1.1\ \text{s}$ 。运输试验运输货物为 $1\ 710\ \text{kg}$ 时,速度达到 $6.5\ \text{km/h}$ 。

关键词:电动拖拉机 双电机驱动 牵引性能 牵引效率

中图分类号: S219.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0008-06

Transmission Performance of Two-wheel Drive Electric Tractor

Xie Bin Zhang Chao Chen Shuo Mao Enrong Du Yuefeng

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Two-wheel drive electric tractor has several advantages, including simple structure and electrically differential and flexible manipulation in narrowly closed working environment, and it enables us to make full use of adhesion and improve adhesion utilization and dynamic performance. The overall structure program of two-wheel drive electric tractor was proposed which adopted two $5\ \text{kW}$ drive motors. Electric drag traction performance was analyzed from both electric tractor load stress and traction efficiency aspects. Matching analysis of transmission components was also put forward based on force balance equation of electric tractor cultivation operation. Tests on traction performance, load startup and transportation conditions were done in the built electric tractor driving test platform. According to the result, the proposed electric tractor torque reached $1\ 800\ \text{N}\cdot\text{m}$, which can meet the need of deeper tillage operations. With load started, driving torque value was increased from $700\ \text{N}\cdot\text{m}$ to $1\ 600\ \text{N}\cdot\text{m}$ and speed was increased from 0 to $7\ \text{km/h}$, which spent about $1.1\ \text{s}$. As for transport experiments, when transported goods were weighed $1\ 710\ \text{kg}$, the speed reached $6.5\ \text{km/h}$.

Key words: Electric tractor Dual motor drive Transmission performance Traction efficiency

引言

随着农业机械化促进法的颁布实施,10年来我国农机产品产销量大幅增长,与此同时,能源消耗也不断增加。因此,开展农业机械电动技术的研究应用,将从很大程度上缓解能源危机。特别对于作业空间封闭狭窄的温室大棚等场合,小型电动拖拉机等农业装备的需求变得日益迫切^[1]。

2012年6月,日本井关农机株式会社与爱媛大学合作研发了小型电动拖拉机,在密闭的大棚内使用而不用担心污染,同时还有噪音小、易操作等优点^[1]。朱思洪^[2-4]的研究团队以基于铅酸电池和串励直流电动机的电动拖拉机为设计实例,对其动力性能和经济性能进行了研究,在构建的电驱动系统试验台基础上,该课题组还对电动拖拉机运输作业和犁耕作业进行了试验。王元杰等设计了温室遥控

电动拖拉机,并进行了分析和相关试验研究^[5]。上述研究中用电动机代替发动机作为动力装置,拖拉机基本机械结构并没改变。双电机驱动电动拖拉机具有明显的优点,可实现电子差速,为实现更精确的控制提供了基础,驱动系统效率更高、调节方式更为多样化,体积小、操作灵活简便^[6]。本文采用双电机驱动方式进行电动拖拉机传动性能研究。

1 总体布置方案

电动车辆驱动形式可分为3种:驱动电动机减速机总成与差速器后桥连接、两驱动轮独立和四轮独立驱动电动车辆。本文提出设施园艺电动拖拉机结构方案为两后驱动轮由电动机独立驱动系统,该种结构方案采用全架式机架设计,布置较为简单、结构紧凑、转弯半径小等特点,动力输出较强,易于实现更多控制功能^[7]。

总体布置方案如图1所示。两电动机与减速机布置于车架尾部两后驱动轮之间,驱动电动机与减速机总成上方布置油箱与提升器。转向电动机与转向机安装于车架中部。电池组均布置于车架前方,液压电动机及泵总成布置于驱动电动机上方,电力元器件布置于电池组上方。驱动方案由两台5 kW、额定转速3 500 r/min的驱动电动机,以及减速比为80:1的行星齿轮减速机实现。

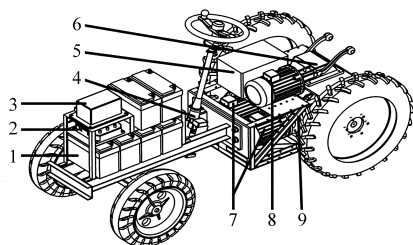


图1 总体布置方案

Fig. 1 Scheme of overall layout

1. 蓄电池 2. 控制器 3. 配电箱 4. 转向电动机 5. 油箱
6. 提升器 7. 驱动电动机 8. 液压电动机及泵总成 9. 减速机

2 电动拖拉机驱动原理和效率计算

2.1 驱动原理

在驱动转矩 T_q 的作用下,驱动轮与地面的接触面与地面之间产生反作用力,反作用力的水平分力的作用方向与行驶方向相同,是推动拖拉机前进的驱动力。

$$F_q = \frac{T_q}{r_d} \quad (1)$$

式中 r_d ——驱动轮半径, m

F_q ——反作用力的水平分力, N

忽略空气阻力和加速阻力,当驱动力 F_q 足以克

服拖拉机前后轮与土壤的反作用力 F_{fc} 和 F_{fq} (滚动阻力)以及作用在拖拉机挂钩上的牵引力 F_T 时,拖拉机能正常行驶。但驱动力受轮胎与地面间的附着系数 F_φ 的限制,不能随电动机转矩 T_e 的增加而增加。因此,拖拉机保持正常行驶的充分和必要条件是^[8]

$$F_\varphi \geq F_q \geq F_T + F_{fc} + F_{fq} = F_T + F_f \quad (2)$$

其中 $F_f = fG_\delta$ $F_\varphi = \lambda_{\max} \varphi_\delta G_\delta$

式中 F_f ——滚动阻力, N

f ——滚动阻力系数 G_δ ——附着重力, N

λ_{\max} ——允许最大载荷分配系数,取0.8

φ_δ ——允许滑转率时的附着系数,取0.6

2.2 牵引效率计算

2.2.1 电动机效率

电动机效率用来衡量电机工作过程中输出的功率损耗。在直流无刷电动机工作过程中,电动机的效率会随着电机工作电流变化而发生变化,效率表示为^[9]

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_b} \quad (3)$$

其中 $P_e = \frac{Tn}{9550}$ $P_b = VI$

式中 P_e ——电动机输出功率, kW

P_b ——蓄电池输出功率, kW

T ——电动机输出转矩, N·m

n ——电动机输出转速, r/min

V ——蓄电池电压, V

I ——蓄电池电流, A

通过试验台试验测得选定直流无刷电机的效率如图2所示。

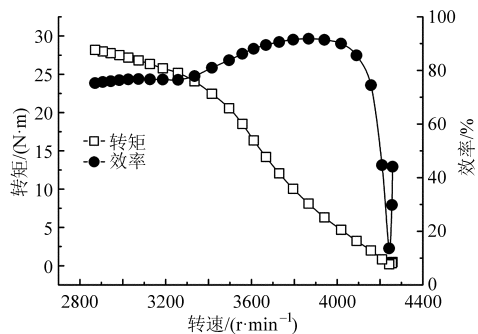


图2 电动机效率曲线

Fig. 2 Curves of motor efficiency

2.2.2 牵引效率

牵引效率用来衡量整个拖拉机的功率损失,其等于拖拉机的牵引功率和相应的电动机功率的比值,用 η_r 表示为

$$\eta_r = \eta_c \eta_\delta \eta_f \quad (4)$$

式中 η_c ——传动系效率 η_δ ——滑转效率

η_f ——滚动效率

2.3 作业性能

拖拉机配有相应的农具,可进行犁耕、旋耕、播种、开沟等田间作业^[10]。以犁耕作业为例,研究电动拖拉机的犁耕性能。

2.3.1 电动拖拉机作业时的力平衡式

电动拖拉机作业时其所受的力主要有:滚动阻力、坡度阻力、犁耕阻力、加速阻力、空气阻力以及电动机驱动力合力。

一般情况路面坡度角较小,特别是对于园艺作业拖拉机,地面可视为水平,因此可认为 $\cos\alpha \approx 1$ 和 $\sin\alpha \approx \tan\alpha \approx i$ 。行驶速度小于 20 km/h 时,可忽略空气阻力^[11],在匀速行驶时,加速阻力为零。故行驶阻力为

$$F = F_f + F_a = fmg\cos\alpha + mgs\sin\alpha \approx mg(f+i) \quad (5)$$

式中 F_a ——上坡阻力,N

α ——路面坡度角,rad

i ——地面坡度系数

F ——行驶阻力,N

2.3.2 作业机组阻力

园艺电动拖拉机作业机组包括悬挂犁耕机组和悬挂旋耕机组两种,对于悬挂犁耕机组,其受力情况较为复杂,由于土壤机械特性复杂多变,目前没有很好的犁耕牵引阻力数学力学模型,一般用测量结果处理后的经验公式来描述。由于所设计的电动拖

拉机作业速度较低,高略契金理论公式能较为准确地描述犁耕作业阻力,该式包含了综合摩擦项、静态阻力项和动态阻力项,简略表达式为^[12]

$$F_x = f_a m_L g + nk_o hb + \varepsilon z h b v^2 \quad (6)$$

式中 F_x ——犁耕牵引阻力,N

f_a ——综合摩擦因数,取 0.3 ~ 0.5

m_L ——犁体质量,kg

k_o ——静态阻力系数,取 0.2 ~ 0.7

h ——单犁体耕深,cm

b ——单犁体耕宽,cm

z ——犁体个数

ε ——动态阻力系数,取 250 ~ 400

v ——机组速度,m/s

3 传动试验条件

3.1 电动拖拉机试验台

如图3、图4所示,电动拖拉机传动试验台主要由机械系统和电控系统组成,机械系统全部固定在基座上,驱动电动机、转矩传感器、减速机、驱动轮等;电气结构主要包括 72 V 电池组、轮速传感器、温度传感器、电流传感器、电压传感器等。采用 LabVIEW 编写试验平台的数据采集、电动机控制、温度监控、人机交换界面等程序,实现控制命令、数据采集及数据处理^[13-16]。



图3 电动拖拉机试验台实物图

Fig.3 Test bed of electric tractor

1. 控制器 2. 采集卡 3. 转矩传感器 4. 半轴桥 5. 驱动轮 6. 加载杠杆 7. 减速机 8. 驱动电动机 9. 电源模块 10. 蓄电池

3.2 加载模型

传动试验台加载装置由加载杠杆、加载砝码、制动蹄和制动鼓组成。当加载砝码时,制动蹄两面张开,并与制动鼓摩擦产生两个摩擦力,对驱动轮形成摩擦阻力矩。基于加载原理和几何参数,加载模型通过试验标定后,砝码质量与加载阻力矩换算公式为

$$y = 173x + 160 \quad (7)$$

式中 x ——加载砝码质量,kg

y ——加载阻力矩,N·m

3.3 试验条件

电动拖拉机驱动试验台参数如表1所示。

试验地点在中国农业大学工学院南地下室。试验条件如表2所示。

根据式(2)得当 $F_T \leq 4\ 876\ \text{N}$ 时,即牵引转矩 $1\ 950.4\ \text{N}\cdot\text{m}$,拖拉机能正常行驶,试验中最大阻力小于 F_T 的最大值即可。根据式(5)、(6),电动拖拉机试验阻力为行驶阻力与作业机组阻力之和。由式(2)、(6)得,作业阻力为 $2\ 795.056 \sim 4\ 192.584\ \text{N}$,阻力矩为 $1\ 118 \sim 1\ 677\ \text{N}\cdot\text{m}$,作用至单边轮上阻力

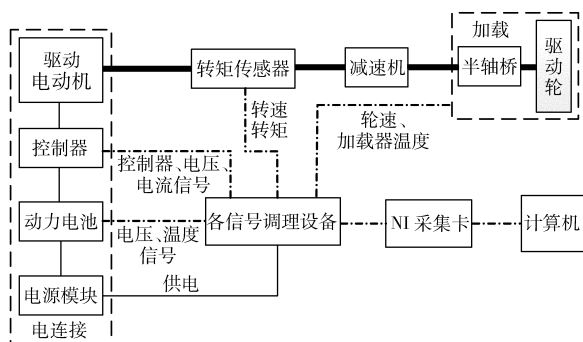


图 4 电动拖拉机试验台结构图

Fig. 4 Structure of electric tractor

表 1 试验台参数

Tab. 1 Experimental parameters

参数	数值
电动机额定功率/W	5 000
电动机额定电压/V	72
电动机额定转速/(r·min ⁻¹)	3 500
电动机最高转速/(r·min ⁻¹)	4 000 ~ 4 500
减速机减速比	80:1
半轴桥壳	时风 200 拖拉机半轴桥壳
驱动轮	7.5-16 驱动轮
转矩传感器	转矩:0~100 N·m, 转速:6 000 r/min
温度传感器	温度量程:0~200℃
车速传感器	车速传感器, 间隙:2 mm
电压传感器	电压量程:0~100 V
电流传感器	电流量程:0~200 A
加载杠杆	调定长度为 1 200 mm
电池组	蓄电池 12 V、120 A·h 6 组

表 2 试验条件

Tab. 2 Experimental conditions

参数	数值
土壤环境	留茬地
拖拉机总质量/kg	1 069
载荷分配系数	0.8
允许滑转率	0.2
附着系数	0.60 ~ 0.65
滚动阻力系数	0.06 ~ 0.07
地面坡度角/rad	0
加速度/(m·s ⁻²)	0
粘土壤比阻/(N·m ⁻²)	13 333
耕深/m	0.15 ~ 0.25
犁铧宽度/m	0.3
犁铧个数	2
机组额定速度/(km·h ⁻¹)	6
动态阻力系数	250 ~ 400

矩为 559.0 ~ 838.5 N·m。

4 试验结果

4.1 牵引性能试验

拖拉机牵引性能决定牵引作业机具配套能力和生产率,是衡量拖拉机作业能力最重要的性能

之一^[17]。

由于试验台自身存在转动惯量,以及试验台同轴度调定存在的微小误差而产生的不同轴转矩,需要对电动拖拉机驱动试验台进行空载标定^[18-19]。标定试验结果如图 5 所示,试验结果表明,不带负载情况下,电动机转速随控制电压升高可连续迅速响应变化,电动机输出转矩有微小波动,该波动由信号干扰以及传感器自身信号波动造成,变化量基本稳定在 1 N·m 内。因此,当电动机不与减速机联接而空载时,可视为电动机转矩输出稳定。

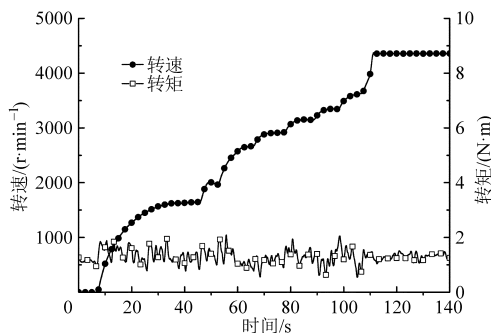


图 5 空载时转速和转矩变化曲线

Fig. 5 Curves of speed and torque under no-load condition

当拖拉机作业耕深发生变化时,拖拉机犁耕阻力大幅上升。根据式(6),当拖拉机耕深为 25 cm 时,电动拖拉机作用至单边轮理想理论阻力矩为 794 N·m,根据式(3)、(4),总传动效率按 60% 计算,理论输出阻力矩 1 323 N·m。

电动拖拉机牵引性能试验步骤如下:空载运行,将电动机控制电压直接调定至 3 V,电动机运行一段时间。然后逐级加卸载砝码,依次为 0.75、2.75、5.25、7.75、2.75、0.75 kg,每一级加卸载后均保持电机控制电压 3 V 不变,且电动机稳定运行一段时间。最后将电动机控制电压调定为 0 V。

如图 6 所示,牵引性能试验中最大加载 7.75 kg 砝码时,根据式(7)可得施加阻力矩为 1 500 N·m。由于加载装置由制动鼓充当,当制动鼓凸轮顶开摩擦片时,制动摩擦片与摩擦鼓为非圆接触,转矩传感器测出驱动轮实际输出转矩达 1 800 N·m,大于理论阻力矩 1 323 N·m,可满足更大耕深作业。此时,电动机最高转速为 2 770 r/min 左右,电动拖拉机作业速度约为 5.2 km/h。牵引性能试验过程中,驱动电动机输出功率结果如图 7 所示,当砝码增加时,驱动电动机的输出功率不断增加,当加载砝码为 2.75 kg 即单边驱动轮输出转矩 635.75 N·m 时,驱动电动机工作在额定功率范围,当载荷增加驱动电动机可过载,试验过程中,电动机发热不明显,功率输出较稳定,驱动电动机过载能力较强。

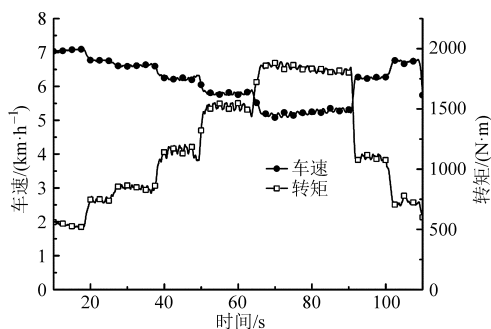


图6 牵引试验时车速和驱动转矩曲线

Fig. 6 Curves of speed and torque in traction performance test

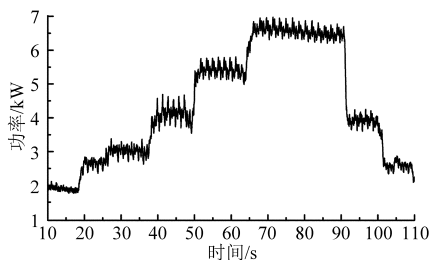


图7 牵引试验时电动机输出功率曲线

Fig. 7 Curve of motor output power in traction performance test

4.2 带载启动试验

在拖拉机作业过程中,拖拉机带载荷启动非常常见。带载荷启动能力是检验电动拖拉机驱动性能最重要的指标之一,驱动电动机启动能力直接关系到驱动电动机能否有效工作^[20]。

驱动电动机运行前系统加载 5 kg 砝码,计算可得阻力矩为 1 025 N·m,此值即为拖拉机在作业时的启动转矩。调节驱动电动机的控制电压,得到的驱动电动机通过减速机输出转矩转速曲线如图 8 所示。

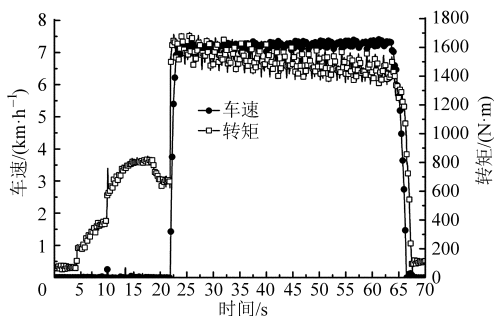


图8 带载荷启动试验时车速和驱动转矩曲线

Fig. 8 Curve of speed and torque in load start test

调节驱动电动机控制电压,从图中可看出,当控制电压较低时,驱动电动机输出转矩增加,但转速变化为 0,当电动机控制电压升高至一定值时,驱动系统启动,电动机转速迅速上升至一定值并保持不变。启动后电动机转速无明显变化,此时驱动电动机转速 2 900 ~ 3 100 r/min,电动拖拉机最高车速 7 km/h。

如图 9 所示为驱动转矩从 700 N·m 至 1 600 N·m 的时间,车速由 0 增至 7 km/h 的时间约为 1.1 s,此时启动阻力矩达到 1 620 N·m。

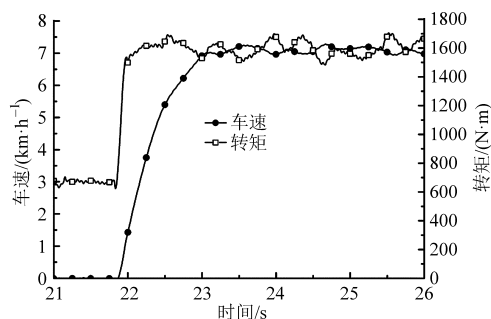


图9 启动瞬间车速和驱动转矩曲线

Fig. 9 Curves of speed and torque at start

4.3 运输工况试验

为了模拟电动拖拉机运输试验工况,试验加载砝码 2 kg,通过转矩计算公式(7)可得,施加阻力矩为 506 N·m,基于电动拖拉机阻力矩理论公式以及固定参考参数,可求得此阻力矩相当于电动拖拉机运输 1 710 kg 货物。试验时电动机控制电压为 3 V,试验结果如图 10 所示。从图中可以得出,电动拖拉机行驶车速为 6.5 km/h,驱动转矩达到 1 000 N·m,满足更高的运输要求。

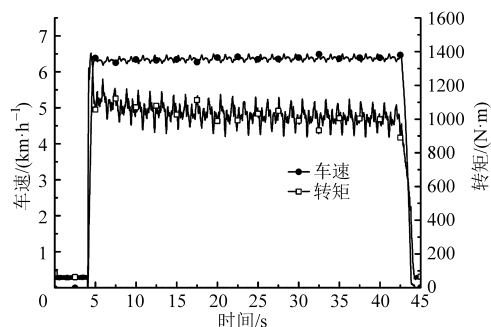


图10 运输工况试验时车速和驱动转矩曲线

Fig. 10 Curves of speed and torque in transport test

5 结论

(1)提出了双轮驱动电动拖拉机的总体结构方案,搭建了传动试验台,并进行了传动性能试验,理论计算和试验结果表明电动拖拉机动力性能匹配合理。

(2)在牵引试验中,电动拖拉机作业速度约为 5.2 km/h,驱动轮实际输出转矩 1 800 N·m,可满足较大耕深作业。

(3)在带载启动试验中,启动阻力矩可以达到 1 620 N·m,从 21.9 s 到 23.0 s,速度达到 7 km/h,启动时间约为 1.1 s,响应快,运行稳定。

(4)在运输工况试验中,施加约为 1 710 kg 货物的阻力时,电动拖拉机行驶速度可达 6.5 km/h。

参 考 文 献

- 1 Yuko Ueka, Jun Yamashita, Kazunobu Sato, 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 高辉松, 朱思洪. 电动拖拉机传动系设计理论与方法研究[J]. *南京农业大学学报*, 2009, 32(1): 140 – 145.
Gao Huisong, Zhu Sihong. Study on design theory and method for driving line of electric tractor [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2009, 32(1): 140 – 145. (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 key techniques[J]. *Tractor and Farm Transporter*, 2007, 34(6): 4 – 7. (in Chinese)
- 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 王永杰, 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 – 28.
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 – 28. (in Chinese)
- 6 Ricardo Pinto de Castro, Hugo Santos Oliveira, José Ricardo Soares, et al. A new FPGA based control system for electrical propulsion with electronic differential[J]. *Power Electronics and Applications*, 2007, 5(2): 1 – 10.
- 7 Jung-Woo Park, Dae-Hyun Koo, Jong-Moo Kim, et al. High performance drive unit for 2-motor driven electric vehicle [C] // *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1999. APEC '99. Fourteenth Annual, 1999, 1: 443 – 449.
- 8 机械电子工业部洛阳拖拉机研究所. 拖拉机设计手册: 上册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 196 – 197.
- 9 秦和. 电动机效率测定方法的进展[J]. *中小型电机*, 2004, 31(1): 65 – 73.
Qin He. Development of measurement on motors efficiency[J]. *S&M Electric Machines*, 2004, 31(1): 65 – 73. (in Chinese)
- 10 镇江农业学院, 洛阳农机学院. 拖拉机理论[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981: 60 – 62.
- 11 周一鸣. 汽车拖拉机学: 汽车拖拉机理论[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000: 126 – 145.
- 12 张宁. 关于犁耕阻力研究之浅析[J]. *粮油加工与食品机械*, 1989(5): 15 – 17.
- 13 王博, 李山. 电动汽车驱动电机实验平台电池模拟系统设计[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2013.
- 14 孙善辉, 夏超英. 电动汽车电机及驱动系统实验平台的设计与开发[J]. *电气传动*, 2006, 36(2): 40 – 44.
Sun Shanhui. Xia Chaoying. Design and development of a test platform for the motor and drive system of the electric vehicle[J]. *Electric Drive*, 2006, 36(2): 40 – 44. (in Chinese)
- 15 陈国迎. 四轮独立线控电动汽车实验平台搭建与集成控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- 16 李星晔. 电动汽车电机控制系统仿真实验平台的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- 17 汪漫, 孙德超, 屈年全. 轮式拖拉机牵引性能的影响因素及改善方法[J]. *农机化研究*, 2004, 5(3): 258 – 259.
Wang Man, Sun Dechao, Qu Nianquan. Factors of wheeled tractor pulling and ways to improve performance[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2004, 5(3): 258 – 259. (in Chinese)
- 18 GB/T 18385—2001 电动汽车 动力性能 实验方法[S]. 2001.
- 19 戴军康. 汽车主减速器总成综合性能试验台的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- 20 卢毅. 温室电动拖拉机主要部件的研究与设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.

(上接第 19 页)

- 12 张金萍, 刘阔, 林剑峰, 等. 挖掘机的 4 自由度自适应模糊滑模控制[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(21): 87 – 92.
Zhang Jinping, Liu Kuo, Lin Jianfeng, et al. 4-DOF adaptive fuzzy sliding mode control of excavator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(21): 87 – 92. (in Chinese)
- 13 Hsu Yachen, Chen Liang, Li Hanxiong. A fuzzy adaptive variable structure controller with applications to robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2001, 31(3): 331 – 340.
- 14 Labiod Salim, Boucherit Mohamed Seghir, Guerra Thierry Marie. Adaptive fuzzy control of a class of MIMO nonlinear systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, 151(1): 59 – 77.
- 15 Byung Kook Yoo, Woon Chul Ham. Adaptive control of robot manipulator using fuzzy compensator[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2000, 8(2): 186 – 199.
- 16 Purwar S, Kara I N, Jha A N. Adaptive control of robot manipulators using fuzzy logic systems under actuator constraints[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, 152(3): 651 – 664.
- 17 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- 18 Ouyang P R, Zhang W J, Madan M Gupta. An adaptive switching learning control method for trajectory tracking of robot manipulators[J]. *Mechatronics*, 2006, 16(1): 51 – 61.
- 19 李鹏, 郑志强. 非线性积分滑模控制方法[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(3): 422 – 426.
Li Peng, Zheng Zhiqiang. Sliding mode control approach with nonlinear integrator[J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(3): 422 – 426. (in Chinese)
- 20 王立新. 自适应模糊系统与控制—设计与稳定性分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.