

# 电动拖拉机驱动力与传动效率特性试验<sup>\*</sup>

高辉松 王珊珊 朱思洪

**【摘要】** 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。在对电动拖拉机驱动力和传动效率进行理论分析的基础上,从整车角度出发建立了驱动力产生方程、总的传动效率以及电动机控制器效率的计算方程。采用室内台架模拟试验的方法对6挡小型四轮电动拖拉机进行了试验研究。研究表明:驱动力特性是下凹的,更适合车辆动力性的要求;不同挡位的驱动力特性各不相同,适合不同作业工况;工作在不同挡位时的传动效率差别较大,其中工作在Ⅵ挡时高效速度范围最宽,效率大于0.5的速度区域占整个Ⅵ挡速度区域的70.6%,因此工作在该挡时经济性最好;正常工作时,电动机控制器效率较高,对电动拖拉机总的传动效率影响不大。

**关键词:** 电动拖拉机 驱动力 传动效率 试验

**中图分类号:** S219.4

**文献标识码:** A

## Experiment on Characteristics of Driving Force and Transmission Efficiency of Electric Tractor

Gao Huisong<sup>1</sup> Wang Shanshan<sup>2</sup> Zhu Sihong<sup>1</sup>

(1. Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. No.3 Middle School in Linyi, Linyi 276000, China)

### Abstract

An experimental study on characteristics of driving force and transmission efficiency of electric tractor was carried out. Based on the theoretical analysis about characteristics of driving force and transmission efficiency of electric tractor, the generation equation of driving force, the calculation equation of transmission efficiency and motor controller efficiency were built up considering the whole tractor. The experimental study was carried out by using the method of indoor simulation experiment. The experimental results showed that the characteristic curves of driving force are down concave, and are more suitable for dynamic performance of the tractor; the characteristic curve of driving force of different shifts is suitable for different working conditions; the transmission efficiency of electric tractor have greater difference when the electric tractor working on different shifts, and the electric tractor has the best economy when it is working on the Ⅵ shift because the wide range of efficient velocity; the motor controller has little effect on transmission efficiency of electric tractor for its high efficiency.

**Key words** Electric tractor, Driving force, Transmission efficiency, Experiment

### 引言

与传统的燃油拖拉机相比,电动拖拉机具有效率高、噪声低、污染小、操作方便等优点。国外研制

了多种电动拖拉机,并对相关性能进行了研究<sup>[1~3]</sup>。

电动拖拉机存在持续作业时间短、续驶里程短等问题。为此,研制高性能的电动拖拉机电动机驱

收稿日期:2008-02-24

<sup>\*</sup>江苏省农机局、南京农业大学工学院科研启动基金资助项目(项目编号:GXZ06003)

高辉松 南京农业大学工学院 博士生,210031 南京市

王珊珊 临沂第三中学 中教,276000 山东省临沂市

朱思洪 南京农业大学工学院 教授 博士生导师 通讯作者

动系统十分必要。为了合理匹配电动拖拉机动力传动系参数,提高动力性能,本文结合小型四轮电动拖拉机的研制,从整车角度对电动拖拉机驱动力特性及效率特性进行试验研究。

## 1 电动拖拉机驱动力和效率模型

### 1.1 驱动力

电动拖拉机驱动力是指地面对驱动轮的反作用力  $F_q$ ,即驱动拖拉机的外力

$$F_q = \frac{M_q}{r_q} = \frac{M_m i_{\Sigma} \eta_T}{r_q} \quad (1)$$

式中  $M_q$ ——作用于驱动轮上的转矩

$r_q$ ——驱动轮半径

$M_m$ ——电动机输出转矩

$i_{\Sigma}$ ——传动系总的传动比

$\eta_T$ ——机械效率(从电动机到驱动轮的传递效率)

对电动拖拉机驱动轮进行受力分析,如图 1 所示。

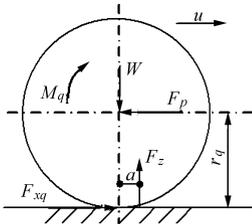


图 1 电动拖拉机驱动轮受力简图

Fig. 1 Force analysis of driving wheel

图中  $W$ ——垂直载荷

$F_z$ ——地面法向反作用力

$F_p$ ——驱动轴水平反作用力

$F_{xq}$ ——地面切向反作用力

$u$ ——电动拖拉机行驶速度

$a$ ——法向反作用力前移距离

图 1 中对轮心取矩,并同除以  $r_q$  可得地面对驱动轮的反作用力为

$$F_{xq} = F_q - \frac{a}{r_q} F_z \quad (2)$$

由式(2)可知,真正作用在驱动轮上驱动拖拉机行驶的力为地面切向反作用力  $F_{xq}$ ,它的数值为驱动力  $F_q$  减去驱动轮上由轮胎迟滞现象引起的滚动阻力。

### 1.2 电动机外特性

由式(1)可以看出,驱动力由电动机输出转矩经过传动系并计入机械效率后传递到驱动轮得到。因此,电动机不同,得到的电动拖拉机输出驱动力特性也不相同。

考虑到拖拉机牵引作业的特殊性,选用串励直流电动机,并通过试验得到其外特性曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出,串励直流电动机启动转矩很大(理想空载转矩为无穷大),并且具有较强的过载能力。

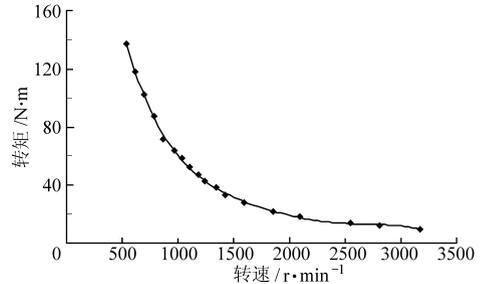


图 2 电动机外特性曲线

Fig. 2 Motor external characteristic curve

### 1.3 传动效率

传动效率是指电动拖拉机的驱动功率与蓄电池输出功率的比值

$$\eta_c = \frac{P_u}{P_b} \quad (3)$$

其中  $P_u = F_q u$   $P_b = \frac{U_b I_b}{1\ 000}$

式中  $P_u$ ——电动拖拉机的驱动功率

$P_b$ ——蓄电池输出功率

$U_b$ ——蓄电池输出电压

$I_b$ ——蓄电池输出电流

与传统燃油拖拉机不同,电动拖拉机的传动效率除了受到变速箱至驱动轮的机械效率  $\eta_T$  影响外,还与电动机和电动机控制器的效率有关,即

$$\eta_c = \eta_T \eta_{mc} \eta_m \quad (4)$$

式中  $\eta_{mc}$ ——电动机控制器效率

$\eta_m$ ——电动机效率

### 1.4 电动机控制器效率

电动机控制器的主要任务是采集给定转速、当前转速、电枢电流等与电动机运行相关的控制输入信号,运用合理的控制算法对信号进行处理,然后驱动主电路中功率元件的通断,从而实现车辆的运转、调速以及制动能量的回收。该控制器的调速特性如图 2 所示,在加速踏板开度一定时,随着转矩的变化,转速沿着图中拟合曲线而变化。由式(4)可以看出,电动机控制器效率直接影响到电动拖拉机传动效率  $\eta_c$ 。电动机控制器的效率可用电动机输入功率与电池组输出功率的比值来表示,即

$$\eta_{mc} = \frac{P_{mi}}{P_b} \quad (5)$$

其中

$$P_{mi} = \frac{U_m I_m}{1\ 000}$$

式中  $P_{mi}$ ——电动机的输入功率

$U_m$ ——电动机的输入电压

$I_m$ ——电动机的输入电流

由式(5)可见,电动机控制器效率决定着电动机从蓄电池获得的功率。

## 2 试验

目前,国内外进行电动车辆试验主要采用室外道路实车试验和室内台架模拟试验2种方式。考虑到技术条件的限制,采用室内台架模拟试验的方式进行研究。根据式(2)分析可知,驱动轮受到的地面切向反作用力要比驱动力小,为了能准确测量电动拖拉机的驱动力,用支架把电动拖拉机支离地面,同时在2个驱动轮外侧分别装有转矩转速传感器,试验台原理如图3所示。

图中,磁粉制动器为模拟加载装置,共有2个,分别加在2个驱动轮外端。试验时,通过调节控制台输出电压来改变2个磁粉制动器的制动力矩,可以模拟电动拖拉机的各种作业工况。在驱动轮和磁粉制动器之间装有转矩转速传感器,用来测试驱动轮的转矩  $M_q$  和转速  $n$ ,采集控制台记录测试数据的同时可以计算出电动拖拉机驱动力  $F_q$  和行驶速

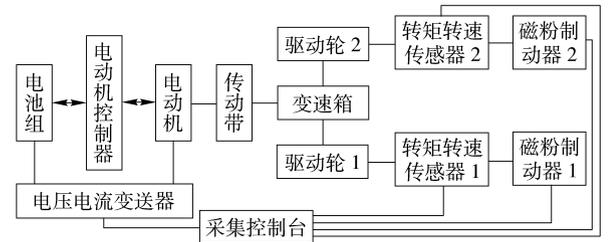


图3 试验台原理框图

Fig. 3 Principle diagram of experimental platform

度  $u$ ,进而计算驱动功率  $P_u$ 。在电池组输出端装有电压电流变送器,用来测试电池组输出电压  $U_b$  和输出电流  $I_b$ ,然后由采集控制台记录数据并计算输出功率  $P_b$ 。而在电动机的输入端也安装有电压电流变送器,用来测试电动机的输入电压  $U_m$  和输入电流  $I_m$ ,再由采集控制台记录数据并计算电动机的输入功率  $P_{mi}$ 。最后,由采集到的数据和计算出的功率根据式(3)和式(5)计算与该组驱动力对应的电动拖拉机传动效率  $\eta_c$  和电动机控制器效率  $\eta_{mc}$ 。

## 3 试验结果分析

采用上述方法进行试验研究。被测电动拖拉机主要参数如表1所示。

由于电动拖拉机驱动力的发挥受地面附着条件

表1 电动拖拉机主要参数  
Tab.1 Main parameters of ET

部件	参数	设计值
电池组	额定电压/V	72
	额定容量/A·h	210
	电池组数/个	12
电动机控制器	调速方法	PWM 调速
	额定功率(最大功率)/kW	5(11)
电动机(串励直流电动机)	额定转速(最高转速)/r·min <sup>-1</sup>	1 500(3 300)
	额定转矩(最大转矩)/N·m	31(139.5)
	传动带	传动比
变速箱(直齿 6 挡)	传动比	85.97(I) 36.9(II) 27.4(III) 23.2(IV) 11.8(V) 7.6(VI)
驱动轮	半径/m	0.399

的限制,正常工作时的最大驱动力应不大于允许滑转率范围内发挥的最大牵引力,即<sup>[4]</sup>

$$F_{q\max} \leq (\lambda_{\max} \phi_{\delta} - f) G_{\max} \quad (6)$$

式中  $\lambda_{\max}$ ——允许最大载荷分配系数,  $\lambda_{\max} = 0.8$

$\phi_{\delta}$ ——允许滑转率时的附着系数,  $\phi_{\delta} = 0.6$

$G_{\max}$ ——最大使用重量

由式(6)计算得:  $F_{q\max} \leq 4\ 707.9\ \text{N}$ 。因此,试验中所加最大载荷只要小于等于  $F_{q\max}$  即可。

图4为电动拖拉机加速踏板踩到最大时的驱动

力特性曲线。从图中可以看出,6个挡位的驱动力特性曲线各不相同,且都呈内凹的形状,与柴油拖拉机外凸的驱动力特性曲线具有明显不同,更接近于理想的汽车驱动力特性场<sup>[5]</sup>,适合车辆动力性的要求;同一车速不同挡位对应的驱动力不同,高挡时对应驱动力要大于低挡时所对应的驱动力,这是由电动机的调速特性决定的;随着车速的增加I挡的驱动力下降的最快,由于电动拖拉机I挡通常用在负荷繁重的犁耕作业和载重爬坡等工况,车速变化不

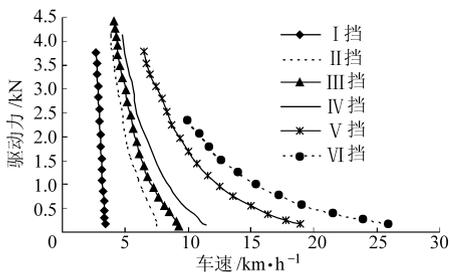


图 4 驱动力特性图

Fig.4 Characteristics of driving force

大,并不影响正常作业;从 II 挡开始,随着车速的增加驱动力变化逐渐趋缓,恒功率工作区变长,特别是 V 挡、VI 挡的驱动力特性曲线变化趋势与理想汽车驱动力的变化趋势基本一致,因此电动拖拉机在这两挡的动力性能最好,特别适合运输作业工况;而 II、III、IV 挡驱动力特性曲线的变化趋势介于 I 挡和 VI 挡,适用于负荷不是很重的其他作业工况,如耙地、播种、田间运输等。

图 5 为与图 4 对应的电动拖拉机传动效率曲线。从图中可以看出,电动拖拉机不同挡位作业时,其传动效率不同;I 挡时电动拖拉机工作在高效区的速度范围很窄,传动效率变化较大;当电动拖拉机工作在前 4 个挡位时,车速越慢,效率越高,而工作在 V、VI 挡时,最高效率则出现在该两挡的理论速度附近,此时,车速加快或减慢都会减小传动效率;在 V、VI 挡工作时,电动拖拉机的经济性较好,而在 VI 挡时高效工作区的可调速度范围最大,效率大于 0.5 的速度区域占整个 VI 挡速度区域的 70.6%,因此不需要频繁换挡即可获得宽广的高效速度范围,经济性最好。

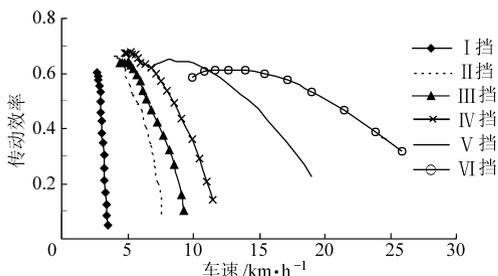


图 5 传动效率特性图

Fig.5 Characteristics of transmission efficiency

表 2 为 I 挡时电动机控制器输入、输出的电压、电流。从表中数据可以看出,随着车辆行驶速度的增大,电动机控制器的输出电压增加,输出电流减小。可见,电动机控制器把采集到的加速踏板信号转换成控制信号,控制功率元件的开关,从而输出相应的电压、电流来调节电动机转速。

图 6 为与图 4 对应的电动机控制器效率曲线。

表 2 电动机控制器电压和电流

Tab.2 Voltage and current of motor controller

行驶速度 /km·h <sup>-1</sup>	输入		输出	
	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A
2.68	69.40	67.28	65.69	67.99
2.79	69.71	64.93	66.09	65.58
2.90	69.90	62.22	66.33	62.84
2.95	70.09	59.36	66.68	59.91
3.03	70.31	56.23	66.95	56.86
3.18	70.50	53.74	67.23	54.35
3.24	70.67	51.50	67.45	52.02
3.37	70.86	49.35	67.79	49.88
3.45	71.18	48.54	68.12	49.17

从图中可以看出,采用 PWM(脉宽调制)调速的电动机控制器,其各挡工作效率都在 0.8 以上,并且都随着车速的增加而增大;电动拖拉机工作在不同挡位时,电动机控制器的效率也各不相同,工作在 I 挡时电动机控制器的效率最高,都在 0.95 以上,当换到高挡再以较低的车速行驶时,电动机控制器的效率变低;实际运行中,电动拖拉机通常工作在各个挡位的理论速度左右,因此电动机控制器效率在 0.9 以上。

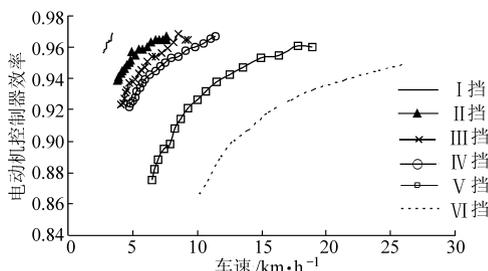


图 6 电动机控制器效率特性图

Fig.6 Characteristics of motor controller efficiency

结合图 5 和图 6 可知,电动机控制器效率达到 0.9 以上,而总的传动效率仅达到 0.5 左右。可见,相对于电动机、带轮、变速箱等部件的效率来说电动机控制器的效率对总的传动效率影响不大。

## 4 结论

(1) 基于串励直流电动机驱动系统的电动拖拉机,工作在不同挡位时的驱动力特性为一组下凹的曲线,更适合车辆动力性要求。

(2) 不同挡位下的驱动力和传动效率差别较大,当电动拖拉机工作在 V、VI 两挡时,动力性和经济性最好。

- Shi Xiangzhong, Yu Zuodong, Xiao Yingkui. The CAD-CFD system design method for hydro-machine[J]. Agriculture & Technology, 2005,25(2):142~144.
- 21 王福军. CFD在水力机械湍流分析与性能预测中的应用[J]. 中国农业大学学报, 2005,10(4):75~80.  
Wang Fujun. Application of CFD to turbulent flow analysis and performance prediction in hydraulic machinery[J]. Journal of China Agricultural University, 2005,10(4):75~80. (in Chinese)
- 22 赵兴艳,苏莫明,张楚华,等. CFD方法在流体机械设计中的应用[J]. 流体机械, 2000,28(3):22~25.  
Zhao Xingyan, Su Moming, Zhang Chuhua, et al. CFD techniques for design of fluid machinery[J]. Fluid Machinery, 2000,28(3):22~25. (in Chinese)
- 23 Goto A, Nohmi M, Sakurai T, et al. Hydrodynamic design system for pumps based on 3-D CAD, CFD, and inverse design method[J]. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 2002, 124(2): 329~335.
- 24 万天虎,赵道利,梁武科,等. 基于CAD/CFD分析系统的流体机械翼型优化[J]. 流体机械, 2005,33(11):37~39.  
Wan Tianhu, Zhao Daoli, Liang Wuke, et al. Aerofoil optimization of fluid machinery based on CAD/CFD system[J]. Fluid Machinery, 2005,33(11):37~39. (in Chinese)
- 25 许志方,董文楚. 论我国喷微灌发展前景和实施建议[J]. 节水灌溉,2004(3):1~4.  
Xu Zhifang, Dong Wenchu. Discussion on development landscape and actualization of sprinkler irrigation and micro irrigation in China[J]. Water Saving Irrigation, 2004(3):1~4. (in Chinese)
- 26 邵国辉,赖喜德,孙见波. 水泵节能的技术途径[J]. 中国水利,2008(4):67~68.
- 27 吴普特,冯浩. 中国节水农业发展战略初探[J]. 农业工程学报,2005,21(6):152~157.  
Wu Pute, Feng Hao. Discussion of the development strategy of water saving agriculture in China[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(6):152~157. (in Chinese)
- 28 许迪,龚时宏. 中国节水农业技术与产品需求分析[J]. 灌溉排水学报,2005,24(1):1~7.  
Xu Di, Gong Shihong. Demand on China's water-saving agriculture technology & product[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005,24(1):1~7. (in Chinese)
- 29 许迪,龚时宏,高本虎,等. 中国节水灌溉产品质量现状分析及改善对策[J]. 农业工程学报,2004,20(5):6~11.  
Xu Di, Gong Shihong, Gao Benhu, et al. Status analysis of the quality of China's efficient irrigation products and perfecting countermeasures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004,20(5):6~11. (in Chinese)
- 30 国家发展和改革委员会、水利部、建设部. 节水型社会建设“十一五”规划[R]. 2006.
- 31 吴书明,彭商志. 中外灌排技术装备发展的比较和启示[J]. 四川农业科技,2008(3):54~56.
- 32 中国工程院“21世纪中国可持续发展水资源战略研究”项目组. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告[J]. 中国工程科学,2000,2(8):1~17.  
Project Group of “Strategic Research on Sustainable Development of Water Resource in China in 21st Century”. Strategic research on sustainable development of water resource in China[J]. Engineering Science, 2000,2(8):1~17. (in Chinese)

(上接第43页)

(3) 电动拖拉机不同挡位的驱动力特性曲线适合不同类型作业工况,为了获得较高的传动效率,在条件允许的情况下应为某些常用作业工况设计与其对应的工作挡位。

(4) 正常工作时,电动机控制器的效率在0.9以上,对电动拖拉机的传动效率影响不大,应重点改善其他传动部件的工作效率,从而提高电动拖拉机的传动效率。

#### 参 考 文 献

- 1 Bodria L, Fiala M. Design and testing of an electric-powered walking tractor[J]. J. Agric. Eng. Res., 1995, 60(1):57~62.
- 2 Arjham W, Koike M, Takigawa T, et al. Preliminary study on the applicability of an electric tractor (part1)[J]. Journal of JSAM, 2001,63(3):130~137.
- 3 Arjham W, Koike M, Takigawa T, et al. Preliminary study on the applicability of an electric tractor (part2)[J]. Journal of JSAM, 2001,63(5):92~99.
- 4 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.
- 5 米奇克 M. 汽车动力学:A卷[M]. 陈荫三,译. 北京:北京人民交通出版社,1997.