

永磁同步电动轮装载机性能试验研究

金晓林, 石来德, 卞永明

(同济大学 机械工程学院, 上海 200092)

摘要: 对永磁同步电动轮驱动技术在装载机上的性能表现进行了理论与试验分析, 表明基于弱磁控制算法的永磁同步电动轮能完全适应装载机的行驶、制动、牵引和转向等各种工况, 也能相互高效协同工作. 用改造的 ZLM15B 装载机在水平水泥路面上进行了上述工况试验. 试验数据表明, 永磁同步电动轮在行驶和牵引工作时效率可达 90% 以上, 能自适应差速转向, 制动过程中电动轮之间转速、转矩的一致性非常好.

关键词: 弱磁控制; 永磁同步电机; 电动轮; 轮式装载机
中图分类号: TP 202; TH243; TM 921 **文献标识码:** A

Experimental Research on Performance of Permanent-magnet-synchronous-electric-wheel Loader

JIN Xiaolin, SHI Laide, BIAN Yongming

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Performance of a wheel loader with permanent-magnet-synchronous-electric-wheel driven technologies was studied by theoretical and experimental methods. Theoretical analysis shows that electric wheels of the loader, based on field-weakening control algorithm, can be well adapted to the traveling, braking, traction and steering conditions with cooperative and efficient work. Experiments on an improved ZLM15B wheel loader under the above driving conditions were carried out on the level cement road. Experiment results further validate that the traveling and traction efficiencies between permanent-magnet-synchronous-electric wheels are both better than 90%, which can well adapt differential steering with good consistency of the speed and the torque between electric wheels under braking.

Key words: field-weakening control; permanent magnet synchronous motor; electric wheel; wheel loader

行走驱动系统是工程机械的重要组成部分. 采用合适的驱动方式以更好地满足工程机械各种行走工况的要求, 一直是工程机械行业研究的热点问题. 随着对工程机械的环境性能要求的逐渐提高, 如低噪声、低振动和清洁排放等, 电力驱动技术正日益受到重视. 电动轮驱动技术^[1]具有结构紧凑, 易于简化传动系统和利于整车布置等特点, 将成为电力驱动技术中的关键技术之一. 相比于唯一应用于特大型矿用自卸车的基于交流感应电机的交流感应电动轮^[2-3], 基于永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)的永磁同步电动轮具有尺寸小、噪音低、功率密度大、与负载无关的高效率、接近 1 的功率因数和宽而精的调速性能等特点, 在电动汽车上有广泛应用, 但到目前为止还没有用于工程机械.

本文以永磁同步电动轮驱动技术在装载机上的性能表现为研究对象, 以 ZLM15B 轮式装载机为试验对象, 立足国内 PMSM 驱动技术, 理论分析了基于弱磁控制算法^[4-5]的永磁同步电动轮在行驶、制动、牵引和转向等不同工况下的适应和协同工作能力, 试验初步验证了永磁同步电动轮驱动装载机在上述工况下拥有良好的性能. 理论分析与试验论证了基于弱磁控制算法的永磁同步电动轮驱动技术在装载机上应用的可行性, 对提高国内工程机械电动轮驱动技术的研究水平具有重大的现实指导意思.

1 永磁同步电动轮驱动装载机

永磁同步电动轮驱动装载机(图 1)行走系统取消了分动箱、液力变矩器和变速箱等机械部件, 改由 2 个永磁同步电动轮前轮驱动, 采用 3 相 380V 交流动力源代替传统柴油发动机. 永磁同步电动轮

收稿日期: 2009-06-10

作者简介: 金晓林(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为机电液一体化. E-mail: heizik@126.com

石来德(1938—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为机械疲劳强度、有限寿命设计、可靠性设计、机械设备状态监测和故障诊断技术及机械控制技术. E-mail: laideshi@tongji.edu.cn

(permanent magnet synchronous electric wheel, PMSEW)由PMSM和行走减速器组成,车轮直接与行走减速器连接,集行走和制动于一体,见图2.行车制动采用PMSM直流注入能耗制动方式,驻车制动由行走减速器内的液压制动器来实现,其额定功率为5.5 kW,峰值功率为10.0 kW,传动比为86,驻车制动力矩为12.5 kN·m.这是国内首次将PMSM应用在工程机械轮边驱动系统中.



图1 永磁同步电动轮驱动装载机
Fig.1 PMSEW driven loader

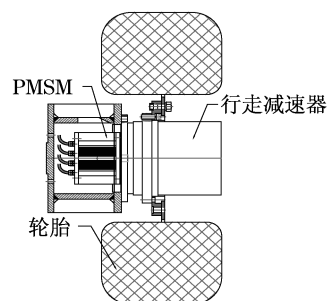


图2 永磁同步电动轮
Fig.2 PMSEW

2 基于弱磁控制算法的两个电动轮的协同工作

由于永磁同步电动轮驱动装载机每个电机可以单独提供驱动转矩,电机之间没有机械联系.整机在行驶、制动、牵引,特别是转向过程中,由于路面、转向半径和横向载荷等因素的影响,使得驱动轮工况极为复杂,如何有效地控制两个电机协同工作,最大化实现同步行驶与制动,高效牵引和差速转向是该电动轮驱动系统的重点和难点^[6-7].采用弱磁控制算法可以有效解决上述问题.轮式装载机受力方程如下^[8]:

$$T = F_f + F_a + F_w + F_s + F_r = F_z \quad (1)$$

式中: T , F_f , F_a , F_w , F_s , F_r 分别为驱动力、滚动阻力、惯性力、风载荷、斜坡阻力和推土阻力; F_z 为全

部阻力之和.则电动轮驱动装载机受力方程为

$$T = \frac{i M_1}{r} + \frac{i M_2}{r} = F_z \quad (2)$$

式中: M_1 , M_2 分别为左、右电机的转矩; r 为电动轮动力半径; i 为行走减速器传动比.

根据能量守恒原则,可得

$$\frac{M_1 n_1 \eta_1}{9\,550} + \frac{M_2 n_2 \eta_2}{9\,550} = \frac{F_z v}{1\,000} \quad (3)$$

式中: n_1 , n_2 分别为左、右电机的转速; η_1 , η_2 分别为左、右电机传动效率; v 为整机速度.

基于弱磁控制算法,电机运行在恒功率模式^[4],则有

$$\frac{M_1 n_1}{9\,550} = \frac{M_2 n_2}{9\,550} = P \quad (4)$$

式中: P 为电机实际使用功率.由公式(3)和公式(4)可得整机速度

$$v = \frac{P}{F_z} (\eta_1 + \eta_2) \quad (5)$$

设左、右驱动轮滑转率分别为 δ_1 和 δ_2 ,轮速度分别为 v_1 和 v_2 ,转弯半径分别为 R_1 和 R_2 .设装载机重心转弯半径为 R ,直行时 $R_1 = R_2 = R$,转弯时 $R_1 \neq R_2 \neq R$.

$$\begin{cases} v_1 = \frac{v}{1 - \delta_1} \frac{R_1}{R} = \frac{\pi r n_1}{30} \\ v_2 = \frac{v}{1 - \delta_2} \frac{R_2}{R} = \frac{\pi r n_2}{30} \end{cases} \quad (6)$$

分别将式(6)代入式(4)得

$$\frac{M_1 R_1}{(1 - \delta_1)} = \frac{M_2 R_2}{(1 - \delta_2)} \quad (7)$$

由式(7)可知,直行时 $R_1 = R_2$,如路面良好则两边阻力矩大致相等,左、右驱动轮滑转率相等;若路面不平则两边阻力矩不等,左、右驱动轮滑转率将各自适应自身阻力矩的大小;即使单边打滑,另外一边还是可以提供驱动力矩,不影响整机工作;转弯时 $R_1 \neq R_2$,左、右驱动轮的滑转率与其外负载自适应.综上所述,基于弱磁控制算法,在不同工况下左、右驱动轮的滑转率均可自适应外负载的变化而协同工作.

3 典型工况试验与分析

整机质量为5.6 t,额定载重量为1.5 t,试验加载1.4 t.全部试验在水平良好的水泥路面上进行.在整个试验过程中,保持工作装置在同一位置.电机

按最大功率运行,轮胎动力半径 0.5 m.

3.1 行驶工况

整机行驶试验结果如表 1 所示,行驶距离为 16.9 m,平均速度为 $5.03 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. 左、右电机试验曲线如图 3 所示,在起步、稳定行驶和停车过程中,两电机转矩和转速的同步性非常好,数值基本一致. 电机转矩基本为 $32 \text{ N} \cdot \text{m}$ 左右;电机转速在 $2\,500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右,换算成速度为 $5.48 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,传动效率达到 91.8%. 即两电机滑转率始终相同,协同工作性能良好.

表 1 行驶试验数据表

Tab.1 Table of experimental data while traveling

试验次数	行驶时间/s	速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
1	12.19	4.99
2	12.12	5.02
3	11.95	5.09

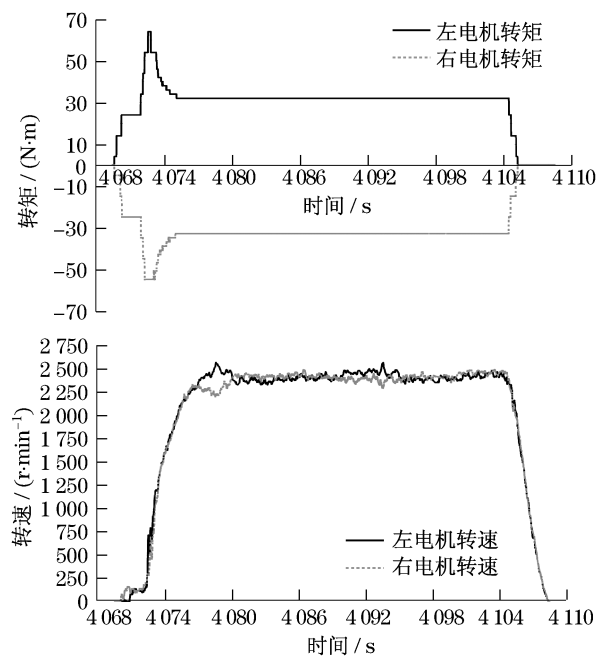


图 3 行驶工况左、右电机转矩转速曲线

Fig.3 Torque and speed curves of the left and right motor while traveling

3.2 制动工况

对于载重汽车,一般要求在水平干燥的沥青路面或混凝土路面,从车速 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 到停止的制动距离不大于 10 m,工程机械参照此值^[9],可知制动加速度应为 $3.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. 从表 2 可知,制动效果不是很理想. 在图 4 中可以发现,电机制动后,电机转速在 3 s 内从 $2\,700 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 迅速降为 0,加速度可达

$7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. 由于采用能耗制动,电机控制器一检测到电机转速为零,电机制动就马上停止,否则电机将反转,造成整机在没有完全停止的情况下,电机先停止且不制动,而整机由于惯性还继续往前走,从而大大影响整机的制动性能. 但从图 4 可清楚地看到,两电机在制动过程中,转速和转矩一致性非常好,弱磁控制作用明显.

表 2 制动试验数据表

Tab.2 Table of experimental data while braking

试验次数	制动距离/m	制动时间/s	加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	平均加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
1	2.6	3.46	0.434	0.5
2	2.8	3.29	0.517	0.5
3	3.0	3.30	0.551	0.5

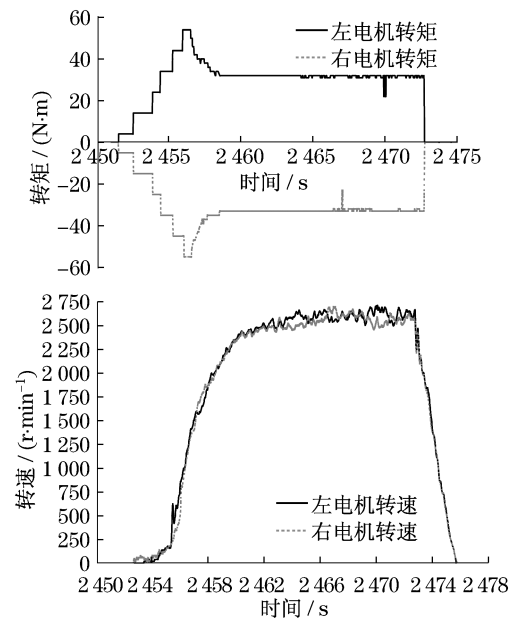


图 4 制动工况左、右电机转矩转速曲线

Fig.4 Torque and speed curves of the left and right motor while braking

3.3 最大牵引工况

装载机在做牵引作业时,电机产生的牵引力满足下式:

$$T = \frac{(M_1 + M_2) i}{r} - fmg \leq \varphi Z \quad (8)$$

式中: f 为地面滚动阻力系数, $f = 0.03^{[8-9]}$; m 为整机质量,包括自重和载重; g 为重力加速度; φ 为地面附着系数,对水泥路面, $\varphi = 0.7^{[8-9]}$; Z 为前桥附着力,实测 ZLM15B 装载机 $Z = \frac{6}{11} mg$; 由 $m = 7 \text{ t}$, 可得地面附着力约为 26.7 kN .

试验(图 5)测量最大牵引力为 26.5 kN 左右. 如

图6所示,左右电机在打滑的同时转矩基本相等,牵引时转矩达到 $90\text{ N}\cdot\text{m}$.代入公式(8)得,电机产生的牵引力为 29.5 kN ,牵引效率达到90%.

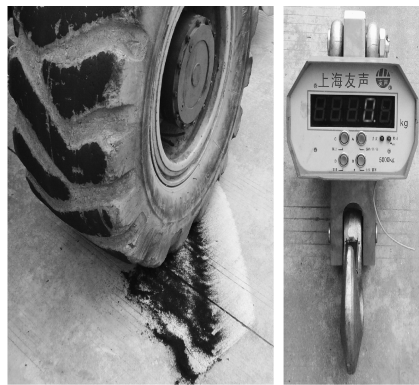


图5 轮胎打滑痕迹及拉力传感器

Fig.5 Tire skid marks and the tension sensor

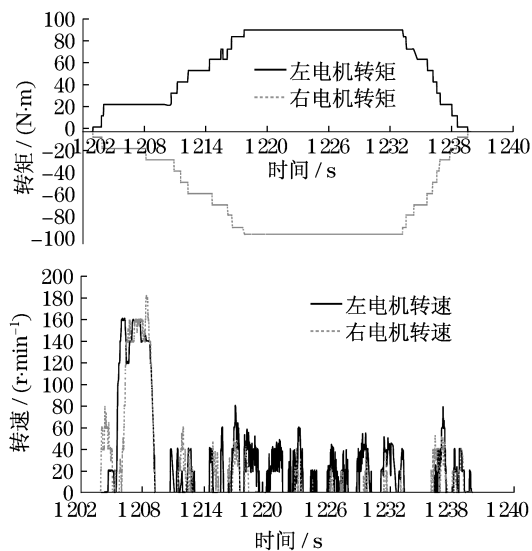


图6 最大牵引工况左、右电机转矩转速曲线

Fig.6 Torque and speed curves of the left and right motor under maximum traction condition

3.4 转向工况

试验在最小转弯半径下完成,实测内外侧转向半径之比为0.62.如图7所示,在整个转向过程中,内外侧电机转速平稳,转速比为 $1700/2700$,与0.62接近;外侧电机转矩在 $22\sim 32\text{ N}\cdot\text{m}$ 之间,内侧电机转矩为 $39\text{ N}\cdot\text{m}$,则外侧电机与内侧电机转矩之比在0.62附近波动.可知两电机自适应协同完成差速转向,整机转向平稳,满足公式(7).

4 结论

(1) 首次将永磁同步电动轮驱动技术应用到轮式装载机中.基于弱磁控制算法,对电动轮之间协同

工作性能做了一定的理论分析,并通过试验证明了各电动轮在行驶、制动、牵引和转向工况下均能独立通过滑转率自适应外负载的变化.

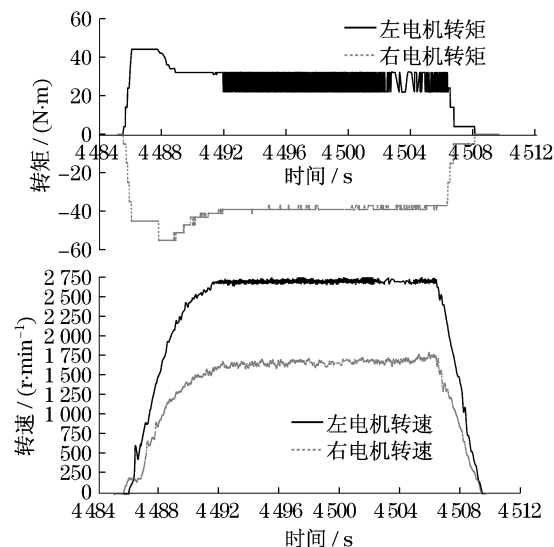


图7 转向工况左、右电机转矩转速曲线

Fig.7 Torque and speed curves of the left and right motor while steering

(2) 从试验结果分析可知,永磁同步电动轮驱动装载机在行驶和牵引工况下,效率均高达90%以上,能平稳差速转向,整机性能良好;制动效果较差,这与采用能耗制动方式有关,但弱磁控制仍良好地保证了制动过程中两电机工作性能的一致性.

(3) 整机制动需要进一步改进.改进措施是综合判断整机车速和电机转速,控制注入电机的制动电流的大小,使两者同时减速到零.此措施也将大大改善整机制动时产生的振动.

(4) 由于试验所选择的路面是水平的水泥硬路面,在松软路面,搓板路面等其他典型路面上的驱动特性需要进一步研究.

参考文献:

- [1] 陈勇,张建荣,张大明.电动轮技术在电动汽车中的应用及发展趋势[J].机械设计与制造,2006(10):169.
CHENG Yong,ZHANG Jianrong,ZHANG Daming. State-of-art of application of hub-motor in electric vehicle [J]. Machinery Design & Manufacture,2006(10):169.
- [2] David L Foster, John F Haupt, Malcolm W Waite, et al. Electric wheel with removable motor: United States,4389586[P]. 1983-06-21.
- [3] Paul Robert Hokanson, Michael Doud Leisenring, Maurice Frank Dalton, et al. AC motorized wheel arrangement: United States, 6651762B1[P]. 2003-11-25.

(下转第1374页)