

非实物动态汽车衡动态校准装置动态力加载系统的设计与分析

温丽钦¹,赖征创^{1,2},杨晓翔^{1,3}

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350116; 2. 福建省计量科学研究院,福建 福州 350003;

3. 泉州师范学院,福建 泉州 362000)

摘要:针对采用实物(砝码+不同轴型的载重货车)方法带来的安全性差、成本高等问题,设计一款基于电动技术和传感器技术的非实物法动态汽车衡动态校准系统。基于 SVPWM 算法建立 PMLSM 空间矢量控制的系统模型,采用电流和速度双闭环方式,在 MATLAB/SIMULINK 环境下搭建仿真模型。仿真结果表明:该双闭环控制模型在变负载的情况下具有良好的鲁棒性和抗干扰能力,实验结果也证明了该款装置校准原理的可行性。

关键词:动态汽车衡;动态校准;动态力加载系统;矢量控制

中图分类号:TH164 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)03-0020-05

Design and Analysis of Dynamic Force Loading System of Dynamic Calibration Device of Non-physical Dynamic Truck Scale

WEN Liqin¹, LAI Zhengchuang^{1,2}, YANG Xiaoxiang^{1,3}

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Fujian Province Institute of Metrology, Fuzhou 350003, China;

3. Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China)

Abstract: To improve the poor safety and reduce the high cost caused by application of real object method (weight + different coaxial type heavy truck), this paper designs a dynamic calibration system of non-real object dynamic truck scale based on electric technology and sensor technology. The system model of PMLSM space vector control is established based on SVPWM algorithm. The simulation model is built in MATLAB/SIMULINK environment by current and speed double closed-loop mode. The simulation results show that the double closed-loop control model has good robustness and anti-interference ability under the condition of variable load, and the experimental results also prove the feasibility of the calibration principle of the device.

Keywords: dynamic truck scale; dynamic calibration; dynamic force loading system; vector control

0 引言

公路计重收费政策是针对车辆超限超载运输的一个可行性举措。我国强制要求动态称重(WIM)系统在初始安装和投入使用后每年进行动态校准^[1]。WIM系统多年来一直用于轴载数据的收集,作为识别潜在超重车辆的重要筛选工具,WIM的计量准确性显得至关重要^[2]。

目前国内的动态汽车衡进行动态校准时所采用的方法主要是使用已知参考质量的检衡车对动态汽车衡的计量准确度进行评判^[3-4]。本文以非实物法校准装置的动态力加载系统为主要研究对象,为了使动态力加载系统满足控制性能好、响应速度快、便于在实验室以及动态汽车衡户外校准现场使用等条件,采用应用较为广泛的基于PI的空间矢量脉宽调制(SVPWM)的矢量控制算法,通过对电流环和速度环引入传统的PI控制器,从而使动态力加载系统满足良好的稳态性能以及装置在校准动态汽车衡时所需的标准动态加载力的要求^[5]。

1 装置动态力加载系统的设计

1.1 装置的校准原理

非实物法动态校准装置的校准原理示意图如图1所示。

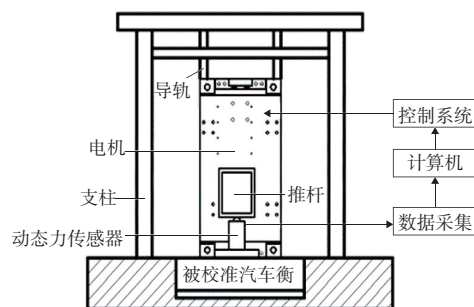


图1 非实物法动态校准装置的校准原理示意图

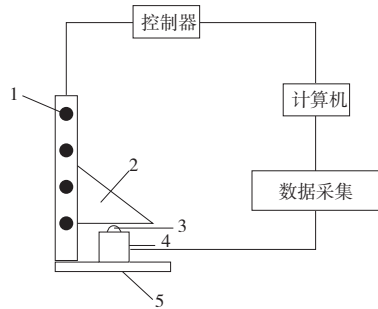
基金项目:福建省属公益类科研院所基本科研专项项目(2019R1016-2);泉州市科技局科技计划项目(2020C055)

第一作者简介:温丽钦(1996—),女,福建莆田人,硕士研究生,研究方向为动态汽车衡校准。

校准时,装置动态力加载系统中的直线电机接收来自驱动器给定的推力指令,电机动子带动动态力加载装置(与动子刚性连接的推杆)对被校准动态汽车衡施加相应的校准力。通过数据采集装置采集标准动态力传感器所测得的信号数据,并与被校准动态汽车衡测量得到的载荷值进行对比,从而得到被校准汽车衡的示值误差,最终达到校准汽车衡的目的。

1.2 装置的动态力加载系统

如图2所示,非实物法动态校准装置的动态力加载系统主要由计算机、控制器、永磁直线同步电机、动态力加载装置、标准动态力传感器及其数据采集装置等组成。直线电机的定子固定在其支撑底座上,动态力加载装置2(推杆)固定在电机动子上,推杆2会随电机动子做上下往复运动,从而给定被校准汽车衡相应的校准力值(即单轴轮重值),标准动态力传感器作为参考传感器用以提供参考的标准力值。



1—直线电机;2—动态力加载装置(推杆);3—垫层;
4—动态力传感器;5—直线电机底部支座。

图2 非实物法校准装置的动态力加载系统框图

2 PMLSM 的矢量控制和数学模型

PMLSM 通常采用 clark 变换和 park 变换原理,将电机的变量转换到 dq 两相同步旋转坐标系下表达^[6],从而将交流电机简化成直流电机,以达到电机各分量解耦的目的。

经坐标变换后,PMLSM 在 dq 旋转坐标下的各方程表达式如下。

电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v n_p \psi_q \\ u_q = Ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \frac{\pi}{\tau} v n_p \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 i_d 、 u_q 、 i_q 分别是 d 、 q 轴的电压和电流; R 为电枢电阻; ψ_d 、 ψ_q 分别是 d 、 q 轴的磁链; n_p 为定子极对数; v 是电机动子的速度; τ 为磁极中心距。

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_d 、 L_q 分别是 d 、 q 轴的电感; ψ_f 是永磁体的磁链。

电磁推力方程为

$$F_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{\tau} [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

本文所用的永磁同步直线电机属于表贴式,即 $L_d = L_q$,式(3)可以表示为

$$F_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{\tau} \psi_f i_q \quad (4)$$

由式(4)可得,PMLSM 的电磁推力 F_e 与励磁电流 i_q 成正比,实现了电机的解耦控制。只要控制好逆变器中电机初级(定子)电流的频率和幅值,就可以得到非实物法动态校准装置校准动态汽车衡所需电机推力的控制特性。

机械平衡方程为

$$m \frac{dv}{dt} = F_e - B_v v - F_l \quad (5)$$

式中: m 是电机动子质量; F_e 是电磁推力; B_v 是黏性摩擦系数; F_l 是外加负载力。

3 仿真分析

根据前文推导的各方程组,在 SIMULINK 当中搭建基于 $i_d = 0$ 的装置动态力加载系统中永磁同步直线电机矢量控制的仿真模型,如图3所示。

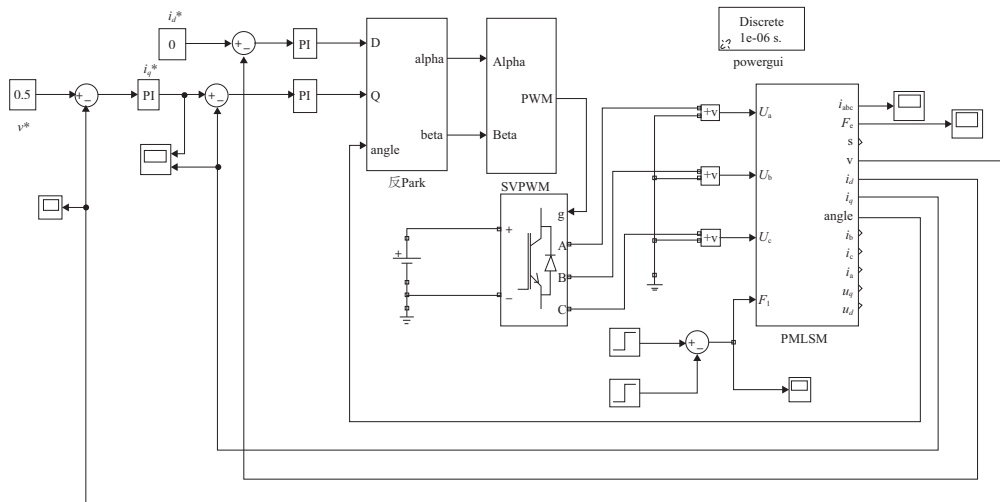


图3 PMLSM 整体仿真模型

本文采用型号为 DDLW-500-100K 的德玛特永磁同步直线电机,电机相关仿真参数如表 1 所示。

表 1 电机仿真参数

参数	数值
电枢电阻 R_s/Ω	4.42
电感 L/mH	60.32
运动部分质量 M/kg	11
摩擦系数 $B_v/(N \cdot s/m)$	0.02
极距 τ/mm	33.6
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.477 6
定子极对数 n	10

系统仿真时间为 1.5 s,电机定子额定速度设定为 0.5 m/s,电机空载启动。为了模拟实际载重货车通过动态汽车衡时的单轴轮质量的变化以及验证该款动态校准装置动态力加载系统的控制系统中所采用的速度和电流

双闭环控制策略的可行性,本文取轮重为 2 000 N 的车辆以速度 10 km/h 经过秤长为 832 mm 的平板式动态汽车衡时所需时间为 0.3 s 进行仿真验证,因此在 0.45 s 和 0.75 s 时给定负载分别由 0 N 突变为 2 000 N,再从 2 000 N 突变为 0 N,以模拟车辆轮胎上下秤时平板式动态汽车衡实时测得的轮重示值变化。经过调试,电机速度环 PI 控制参数 K_p 、 K_i 值分别为 5 和 50;电机电流环 PI 控制参数 K_p 、 K_i 值分别为 100 和 1 000。

图 4 给出了电机定子速度变化曲线图。从图 4 可以看出,在 0.45 s 和 0.75 s 轮重发生变化时,速度的波动比较小,且很快跟随到给定的电机定子额定速度 0.5 m/s。图 5、图 6 分别给出了电机的电磁推力 F_e 和电机 q 轴电流 i_q 的变化曲线图。如图 5、图 6 所示,系统在 0.45 s 加入负载时,电流突增,电磁推力也突增到与给定的外加负载值相同的 2 000 N。由此可见,电机的电磁推力 F_e 和 q 轴电流 i_q 在采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略时,推力和电流的脉动都比较小,从而验证了该仿真模型具有良好的鲁棒性和抗干扰能力。

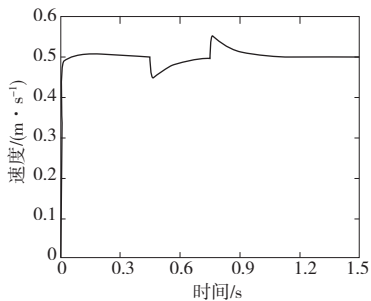


图 4 电机定子速度的变化曲线

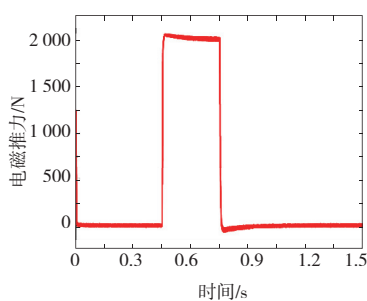
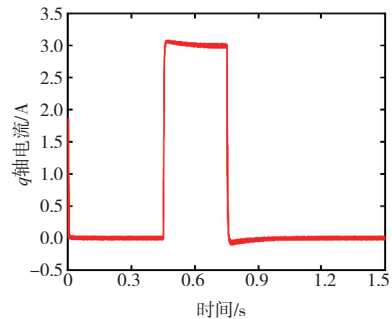


图 5 电机电磁推力的变化曲线

图 6 电机 q 轴电流的变化曲线

4 装置原理性验证实验与分析

4.1 装置动态力加载系统实验验证

为了进一步验证非实物动态校准装置校准原理的合理性以及动态力加载系统控制算法的可行性,将标定好的电机接入动态力加载系统中相对应的位置,最终搭建的非实物动态校准装置动态力加载系统实验平台如图 7 所示。

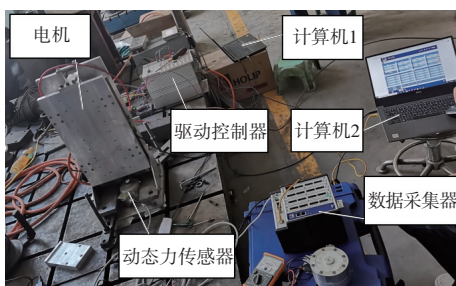


图 7 非实物动态校准装置动态力加载系统实验平台

为了模拟实际检衡车过秤校准动态汽车衡的情况,本文进行了 10 组不同给定电机推力值 100~1 000 N 的实验。实验中采样频率是 1 200 Hz,数据采集装置中采用滤

波频率为 100 Hz 的贝塞尔低通滤波器。在装置动态力加载系统中,采用型号为 S084.032.0002.0101.2 的路斯特驱动器,将系统控制算法程序写入 DSP 开发板,由与控制器连接的威纶触摸屏(图 8)进行给定推力值、加载时间和周期时间的设置。再由计算机 1 通过数据线与控制器相连接读取在相应的给定推力值下电机的 q 轴电流值,最终得到的实验数据如表 2 所示。对数据进行多项式拟合,可以得到给定推力值与电机电流值的变化曲线图如图 9 所示。从图 9 可以看出,电机 q 轴电流值与给定推力值之间具有良好的线性相关性,验证了电机在加载稳定后电磁推力 F_e 与 q 轴电流 i_q 呈正相关的规律。

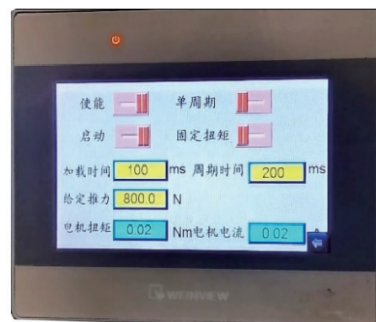


图 8 MT8050IE 威纶触摸屏

表2 给定推力值与电机电流值的数据

给定推力值/N	电机电流值/A	给定推力值/N	电机电流值/A
100	0.541 5	600	3.237 0
200	1.078 4	700	3.776 0
300	1.623 0	800	4.314 4
400	2.162 1	900	4.861 9
500	2.704 4	1 000	5.409 7

电机在分别给定推力值 100 N~1 000 N 实验中,数据采集器依次采集标准动态力传感器在对应给定推力值下

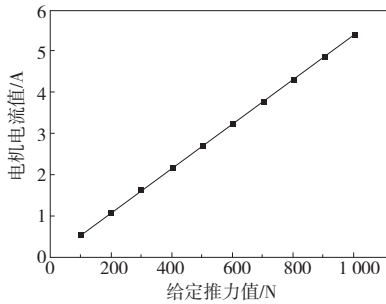


图9 给定推力值与电机电流值的变化曲线

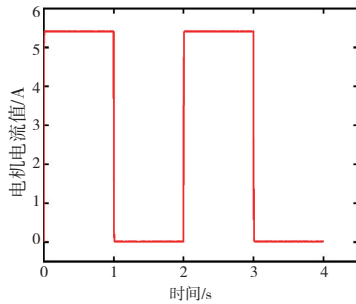


图10 给定推力1000N时的电机电流值

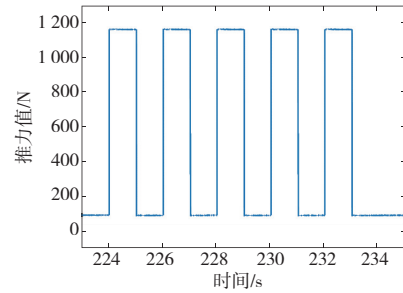


图11 给定推力1000N时动态力传感器测得的电机推力值

所测得的力值。图10和图11分别给出了在给定推力值为1000N时所对应的电机q轴电流值和动态力传感器所测得的推力值。由图10可以看出,电机在启动后q轴电流值很快达到稳定值5.4A,本实验给定脉冲持续时间为1s,以便模拟实际载重货车通过动态汽车衡秤台时间极短的情况。由图11可以看出,由于电机转子自质量的原因,在还未给定电机推力值时,标准动态力传感器测得电机转子的重量约为96N,在给定电机推力值为1000N时,动态力传感器测得的值约为1160N,与实际给定推力值1000N的误差约为6.4%。

表3给出了在初始给定推力100~1000N时装置动态力加载系统实际给定推力值的误差表。从表3可以看出,当电机初始给定推力值从100N增加到600N时,减去电机转子重量96N后装置实际给定推力值误差在-3%~5.7%之间。从初始给定推力值700N开始,误差逐渐趋于稳定值,最终装置动态力加载系统实际给定推力值的误差约为6.4%。

表3 初始给定推力100~1000N时装置动态力加载系统实际给定推力值的误差表

初始给定推力值/N	力传感器测得力值/N	实际给定推力值/N	误差/%
100	193	97	-3.0
200	299	203	1.5
300	407	311	3.7
400	514	418	4.5
500	622	526	5.2
600	730	634	5.7
700	839	743	6.1
800	946	850	6.3
900	1 054	958	6.4
1 000	1 160	1 064	6.4

车衡如图12所示。该款汽车衡有两个独立秤体(分别用于测量检衡车左、右轮质量,汽车衡在行车方向的有效称重长度为832mm),安装于同一车道上。本次平板式动态汽车衡的校准实验采用二轴、三轴、四轴、六轴4种检衡车车型,在动态校准实验前对各轴型检衡车进行静态称重时所得到的不同轴型检衡车相对应的各轴轴质量数据如表4所示,在正式的动态校准实验中实时采集不同轴型检衡车过秤时前后轴的轴质量数据波形图。实验所用的汽车衡配套的称重数据采集装置如图13所示。



图12 称重校准实验所用平板式动态汽车衡

表4 不同轴型检衡车相对应的各轴轴质量数据表
单位:kg

各车型对应轴数	不同车型对应的各轴轴质量			
	二轴车	三轴车	四轴车	六轴车
第一轴	1 600	6 550	6 160	5 590
第二轴	3 200	7 850	8 520	6 860
第三轴	—	6 150	6 430	4 420
第四轴	—	—	5 450	4 470
第五轴	—	—	—	3 880
第六轴	—	—	—	5 810

4.2 实际检衡车过秤实验

为了验证该款装置动态力加载系统产生的力值波形基本与实际检衡车在低速状态下校准动态汽车衡时的过秤波形保持一致,即近似呈现矩形波的形态,本文在福建省计量科学研究院闽侯实验基地分别进行了不同轴型的检衡车以10km/h速度反复通过平板式动态汽车衡的称重校准实验。实验测试路面为双车道,所用平板式动态汽

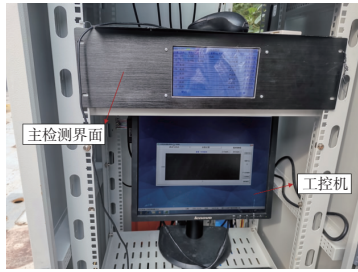
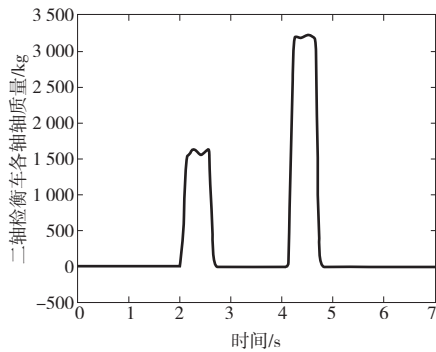


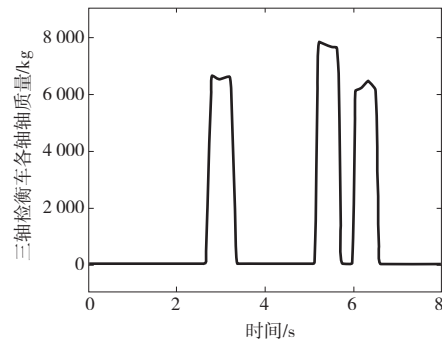
图 13 平板式汽车衡配套的称重数据采集装置

图 14 给出了不同轴型检衡车过秤的轴质量波形图。从图 14 可以看出,由于检衡车在实际行驶过程中存在车

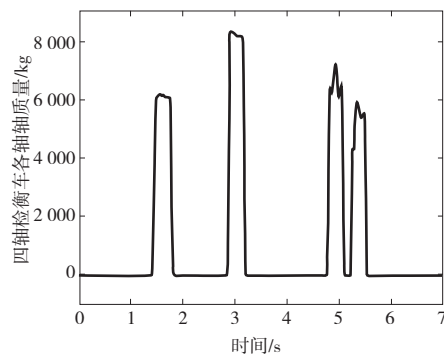
身及其他振动的影响,因此所采集到的实际检衡车各轴轴质量波形图存在一定的波动。由于检衡车在高速下校准动态汽车衡时所采集到的轴质量数据与实际检衡车轴质量之间的误差会偏大,因此本文进行了 10 km/h 速度下的校准实验。由图 14 可以看出,实际检衡车在低速状态下校准动态汽车衡时的过秤波形与采用本文的非实物动态汽车衡校准装置动态力加载系统产生的力值波形基本保持一致,都近似呈现矩形波的形态。除此之外,采用校准装置校准汽车衡时所采集的轮质量波形图的波动明显比实际检衡车过秤的轴质量波形的波动小,意味着整个动态汽车衡称重系统实时采集到的称重数据所受到的动态分量干扰少,有利于提高后期称重数据处理的精度。



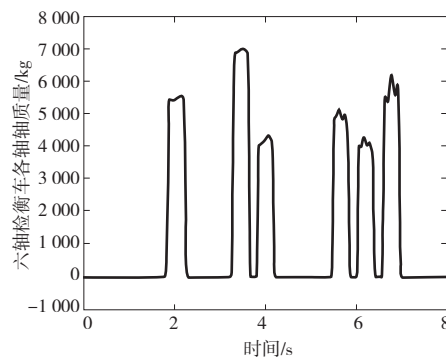
(a) 二轴检衡车过秤的轴质量波形图



(b) 三轴检衡车过秤的轴质量波形图



(c) 四轴检衡车过秤的轴质量波形图



(d) 六轴检衡车过秤的轴质量波形图

图 14 不同轴型检衡车过秤的轴质量波形图

5 结语

本文初步探索了一款非实物法动态汽车衡动态校准装置,并着重研究了装置动态力加载系统的控制策略以及装置校准原理可行性的验证实验。验证实验表明,该款装置产生的力值波形与实际检衡车过秤波形基本一致。该款装置能够代替传统检衡车对动态汽车衡进行校准工作,具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] DING Y, CHENG L R. Dynamic calibration of a weigh in motion system [C]//Proceedings of 2018 Joint Rail Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA: 2018.

[2] GAJDA J, SROKA R, ZEGLÉN T. Accuracy analysis of WIM systems calibrated using pre-weighted vehicles method [J]. Metrology and Measurement Systems, 2007, 14: 517-527.
 [3] 吴佳猛. 一种电子汽车衡快速检定装置的研发[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
 [4] 鲁新光, 申东滨, 李平, 等. 一文读懂动态称重[J]. 中国公路, 2020(10): 46-48.
 [5] 张笑薇. 基于 DSP 的直线电机驱动控制系统设计[D]. 南京: 东南大学, 2015.
 [6] 石燕燕, 陈锡渠. 基于非线性扰动观测器的永磁同步电机优化控制[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(4): 183-186.

收稿日期: 2021-11-29