doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.011

柔性底盘性能检测试验台设计与应用

宋树杰[1]　李翊宁[2]　瞿济伟[2]　周　伟[2]　张宗玲[1]　郭康权[2,3]

(1.西北农林科技大学食品科学与工程学院,陕西杨凌 712100;2.西北农林科技大学机械与电子工程学院,陕西杨凌 712100;3.陕西省农业装备工程技术研究中心,陕西杨凌 712100)

摘要:为了检测基于偏置转向轴结构的四轮独立驱动、独立转向柔性底盘的性能和运动控制参数,试制了一种由 4 个水平转盘构成的柔性底盘性能检测试验台,设计了试验台检测控制电路和系统软件。通过柔性底盘在试验台上的运行,模拟直行和 90°横行运动,进行柔性底盘运动性能及控制参数的测试。试验结果表明:在不同运动状态下柔性底盘轮毂电机的转速从 0 增加到匀速状态所需的时间为 2 ~ 3 s,柔性底盘直行和 90°横行的牵引力分别可以达到 1 132 N 和 1 165 N;定速行驶时,柔性底盘各轮毂电机的驱动力不同,需要实时自动调节各轮毂电机的驱动电流,保证各独立驱动的轮毂电机协调运动。测试结果可为四轮独立驱动独立转向柔性底盘控制策略的制定和参数优化提供依据。

关键词:柔性底盘;测控系统;试验台;水平转盘

中图分类号:S229$^+$.1;U467.5$^+$24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2016)02-0077-07

Development and Application of Test Bench for Flexible Chassis

Song Shujie[1]　Li Yining[2]　Qu Jiwei[2]　Zhou Wei[2]　Zhang Zongling[1]　Guo Kangquan[2,3]

(1. *College of Food Science and Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*

2. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*

3. *Engineering Research Centre for Agricultural Equipment*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Flexible chassis is a four-wheel-independent-drive and four-wheel-independent-steer electric vehicle with four in-wheel motors. In order to resolve some key issues about dynamics of the flexible chassis and find its control strategy, a new type of test bench with four turntables was designed for testing the flexible chassis. The flexible chassis was connected to the bench through two groups of sensors with measurement directions being perpendicular to each other. A measurement and control system based on LabView was developed for the test bench, and it can control and record the rotating speeds and electric current of the eight in-wheel motors and the forces of the four force sensors. Firstly, the whole structure design was completed, the working principle of the device was analyzed and a testing system was developed. Secondly, the bench and assemble observation system were made. Finally, the experiment was carried out. The experiment contained two parts. For the fixed rotation speeds of four wheels of flexible chassis, the changing processes of the rotating speed, electric current and the forces at a rotation speed of 55 r/min were monitored and analyzed with two different movement postures of chassis. For the different rotation speeds, the same indexes were analyzed to find the final results. In different motion states of flexible chassis, it took 2 ~ 3 s for in-wheel motors' rotation speed to increase from 0 to stable state. Tractions of flexible chassis can reach 1 132 N and 1 165 N, respectively, when running up-down and left-right; driving force of each in-wheel motor, running at a constant speed, was different, so real-

收稿日期:2015-06-10　修回日期:2015-09-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51375401)

作者简介:宋树杰(1987—),男,博士生,主要从事农产品储运设备车辆研究,E-mail:songshu_jie@163.com

通信作者:郭康权(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备研究,E-mail:jdgkq@nwsuaf.edu.cn

time automatic adjustment of each in-wheel motors' current was required to ensure the coordinated movement of each wheel when driving independently. The test results could provide basic data for study of flexible chassis and it also proved that the bench was feasible and efficient. The research results provided theoretical and technical references for design of the new type of test bench.

Key words: flexible chassis; measurement and control system; test bench; turntable

引言

柔性底盘是一种基于偏置转向轴结构的四轮独立驱动、独立转向的动力底盘,该底盘将驱动和转向机构合二为一,利用每一个电动轮与车架的相对位置进行转向[1-2]。该底盘可以实现原地调头,90°横向行驶,任意角度的斜向行驶,可以作为空间狭小半封闭或全封闭的环境下的动力底盘或驱动装置。由于柔性底盘的每个电动轮独立驱动,所以 4 个电动轮的协同运动控制参数是该底盘开发的关键所在,同时该底盘又是一个复杂的非线性系统[3],不能通过路面行驶的方法测得运动控制参数。因此,设计试制了专用柔性底盘试验台,进行系统性能测试,为控制策略的优化提供基础数据,有助于柔性底盘开发和降低成本[4]。

国内外针对四轮独立驱动四轮独立转向电动车底盘的试验台鲜有报道,现有文献主要是针对电动车底盘的试验台架研究[5-10],很少见到用于偏置轴向轴结构的四轮独立驱动、独立转向柔性底盘运动参数的测试和运动规律研究的报道。

为了测试柔性底盘的运动特性和控制参数,本文开发一种由 4 个水平转盘构成的柔性底盘测试试验台,通过控制电路驱动轮毂电机在水平转盘上运动,来模拟柔性底盘在路面上的行驶,同时采用 LabView 开发试验台的测控系统。通过控制柔性底盘的不同运动形式进行试验,测得柔性底盘运动规律与控制参数。

1 柔性底盘试验台的结构与工作原理

柔性底盘试验台的测试对象为西北农林科技大学研制的柔性底盘[11-12],其结构如图 1 所示,主要由车架、偏置转向轴、电磁摩擦锁、减震器和轮毂电机等部分组成。主要技术参数如表 1 所示。

1.1 试验台工作原理

柔性底盘试验台是在柔性底盘的每个电动轮下,设置一回转中心与柔性底盘轴向轴线同心的水平转盘,另外,在 4 个水平转盘下布置 4 个与底盘同型号的轮毂电机。可以用底盘的轮毂电机驱动水平转盘转动,也可以用水平转盘驱动底盘的轮毂电机转动。其工作原理是:将柔性底盘的 4 个轮毂电机分别置于 4 个水平钢制圆盘之上,使底盘的垂直载荷直接作用于 4 个水平转盘,同时,底盘和试验台之间的水平作用力和力矩采用 2 个横向和 2 个纵向布置的力传感器检测。模拟正常运行时,给电磁摩擦锁通电,锁紧偏置转向轴,用轮毂电机驱动水平转盘转动;模拟转向时,给偏置转向轴断电,松开电磁摩擦锁,用水平布置的电动轮驱动柔性底盘的轮毂电机,带动偏置转向轴相对车架转动,完成转向运动。它不仅能够模拟底盘不同的运行工况和工作模式,如加速、减速和转弯等,还要能够对不同的姿势进行测试。该柔性底盘试验台有以下优点:①可以在室内就地试验,不需室外试验场地。②可以测力、力矩,可以改变相对速度,也可以改变垂直载荷。③结构简单,占地面积小,造价低[13]。

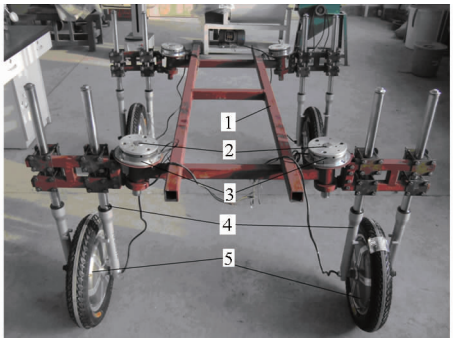


图 1 柔性底盘一代样车

Fig. 1 First sample vehicle of flexible chassis

1. 车架 2. 偏置转向轴 3. 电磁摩擦锁 4. 减震器 5. 轮毂电机

表 1 柔性底盘的主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of flexible chassis

参数	数值
转向轴横向中心距离/mm	610.5
转向轴纵向中心距离/mm	1 210.6
空车车架至地面的距离/mm	580.7
空车总质量/kg	202.6

1.2 试验台结构

柔性底盘试验台的机械结构如图 2 所示。4 个水平转盘分别与 4 个电动轮刚性固连,每个水平转盘的回转中心轴正好分别在柔性底盘 4 个偏置转向轴轴线的延长线上,并在上下两处与试验台支架连接,每个水平转盘在前、后、左、右 4 个方向分别用 4 个橡胶支撑轮辅助支撑,以保证水平及运转平稳。

各水平转盘也可以分别铺设其他材料，如沥青等，来模仿柔性底盘在不同材质路面状态行驶。在试验台的 4 角分别安装了高度调节螺钉，用以调节试验台的水平位置。柔性底盘和试验台使用的轮毂电机[14]主要技术参数如表 2 所示。图 2 俯视图中，a、b、c 和 d 为力传感器安装位置。

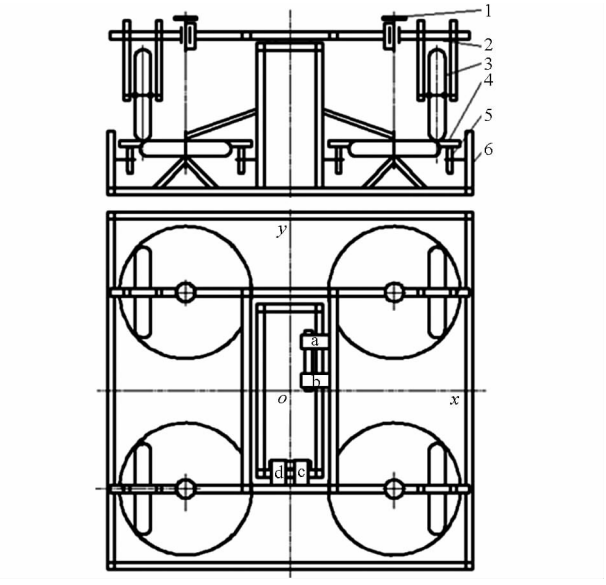


图 2　试验台结构原理图

Fig. 2　Schematic diagram of test bench

1. 偏置转向轴　2. 转臂　3. 轮毂电机　4. 水平转盘　5. 支撑轮　6. 试验台支架

表 2　轮毂电机的主要技术参数

Tab. 2　Main technical parameters of IWM

参数	数值
额定功率/W	500
额定转速/(r·min^{-1})	300
最大输出转矩/(N·m)	36
空载直径/mm	320

1.3　力传感器安装

柔性底盘与试验台在高度方向留有一定的间隙，用于安装横向和纵向的两组力传感器(TJL－4 型，BBTG 公司)。力传感器的布置如图 2 所示，其中传感器 a 和 b 测量 x 方向的作用力，c 和 d 的测量 y 方向的作用力。为了便于拉压力传感器的安装和柔性底盘与试验台的定位，同时保证传感器只承受一个方向的力，设计了力传感器安装辅助连接板，如图 3 所示。辅助连接板 5 与试验台固连，其上开设长方孔，力传感器的销轴上安装的滚动轴承正好嵌入到该长方孔中，并能够在非测力方向游动，保证力传感器仅承受拉压力。同时力传感器的另一端与底盘之间用一对螺栓固连。用 4 个力传感器将底盘与试验台在水平面上连接和定位，保证柔性底盘和试验台之间的水平作用力能够检测，同时使底盘能够从试验台上垂直抬起后移下。图 3 给出了其中一个力传感器的安装示意图。

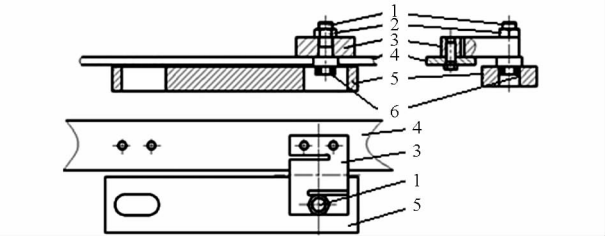


图 3　力传感器安装图

Fig. 3　Installation of four force sensors

1. 传感器销轴　2. 螺母　3. 力传感器　4. 底盘架　5. 连接板　6. 滚动轴承

1.4　试验台总成

试制的柔性底盘试验台总成如图 4 所示。测试试验台放置在坚固的地面。试验前，调节试验台的地脚螺栓，使其处于水平状态。

图 4　柔性底盘试验台总成

Fig. 4　Picture of test bench and flexible chassis

2　试验台测控系统

试验台控制系统主要完成信号采集、通信、转速控制、电流监测、数据保存等功能，是试验台的核心部分，框图如图 5 所示。系统的核心控制模块(Core control module，CCM)采用 2 个 STMicroelectronics 公司生产的 STM32F103VET6 型号的单片机，完成对轮毂电机的控制及各传感器相关数据的处理和采集。上位机采用研华科技公司设计的型号为 610H 工控机作为人机交互工具，显示界面和存储数据。试验台控制系统采用比例积分微分(Proportion，integration，differentiation，PID)算法的闭环控制[15－16]，通过脉宽调制(Pulse-width modulation，PWM)技术[17－18]的方式控制各柔性底盘轮毂电机及水平转盘的转速，除了进行加速、减速和固定速度行驶外，还可以根据速度谱进行速度控制。

2.1　信号检测

试验台主要检测信号有：柔性底盘 4 个轮毂电机转速、4 个水平转盘转速、各轮毂电机输入电流和 4 个力传感器的力。轮毂电机的转速用霍尔传感器

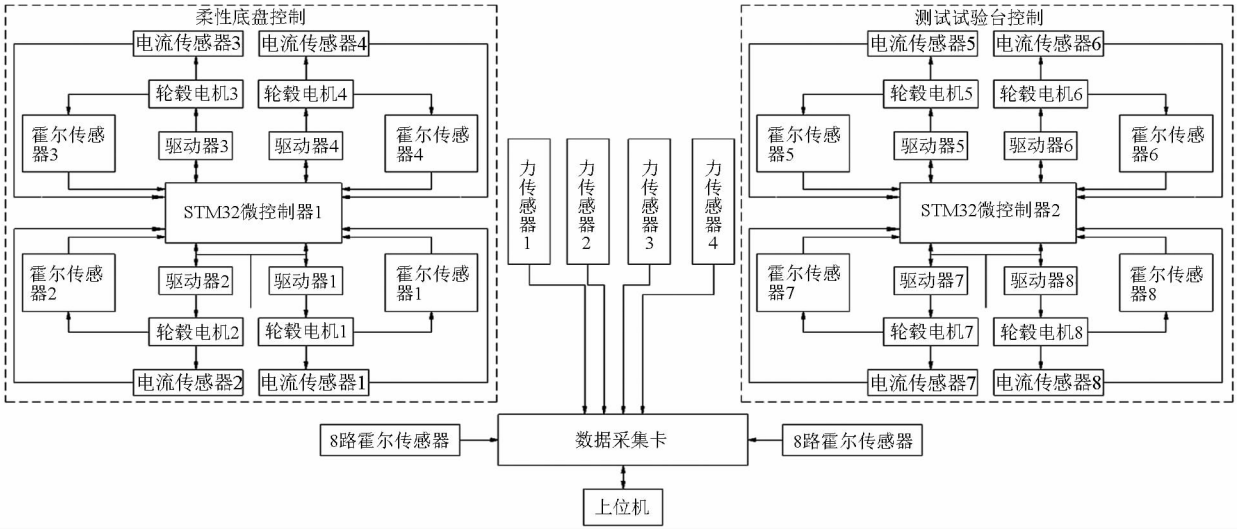


图 5 控制和测试系统框图

Fig. 5 Block diagram for control and testing system

(D046 型,龙戈电子)检测,方法是在被测轮毂电机上贴 K 个磁钢片,则通过检测霍尔传感器信号频率得到轮毂电机的转速,其关系式为

$$n=\frac{60f}{K} \tag{1}$$

式中 n——轮毂电机转速,r/min

f——霍尔信号频率,Hz

另外,各轮毂电机的驱动电流采用霍尔式电流传感器(wcs1800 型, Winson 公司)测量。

2.2 数据采集

利用上位机系统进行试验数据的采集和记录。数据采集卡采用北京中泰研创公司生产的 PCI8326B 型 32 路 12 位采集卡,同时采集 4 路力传感器、8 路转速传感器和 8 路电流传感器的模拟信号值,并将其转换成数字信号进行存储和比较分析。

2.3 软件系统

柔性底盘试验台的软件系统包括各传感器数据的采集、显示和保存等功能模块。采用 LabView 完成柔性底盘各轮毂电机的转速、试验台水平转盘的转速,一共有 8 个电流信号和 4 个力传感器信息的采集[19-20]。测控软件的界面如图 6 所示。

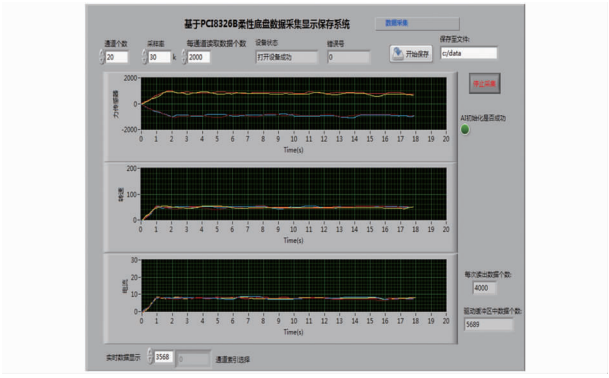
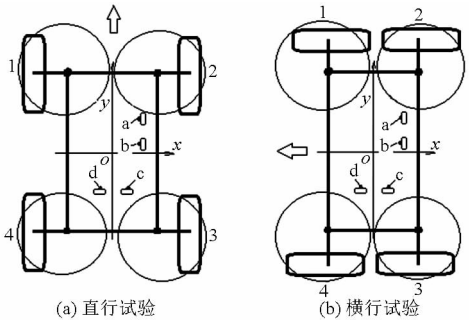


图 6 测试试验台测控软件界面

Fig. 6 Interface of testing software for test bench



(a) 直行试验 (b) 横行试验

图 7 柔性底盘的直行和横行模拟试验

Fig. 7 Up-down and left-right tests of flexible chassis

注:传感器位置坐标 a(0.072 4,0.240 4)、b(0.072 4,0.050 2)、c(0.095 3,-0.072 4)和 d(-0.095 3,-0.072 4),单位:m。

3 试验过程

模拟试验采用柔性底盘的轮毂电机驱动试验台的水平转盘运动。柔性底盘可以采用直行、原地转向、45°斜行和 90°横行等 4 种不同的运动形式进行模拟试验,本文主要分析直行和 90°横行两种运动形式,如图 7 所示。

试验前,利用水平仪调节试验台机架和各水平转盘处于水平状态。试验操作过程如下:①检查轮胎气压及关键部位的松紧程度。②检查各传感器的连接及信号输出。③测量各偏置轴所需要的转向角度,并锁紧电磁摩擦锁。④检查底盘与试验台的连接,并通过左右上下移动,使各力传感器输出尽量为 0,同时保证上下轴线对齐。⑤利用转速较低的速度运行进行预试验,保证传感器的结合可靠,同时检查监控设备。⑥在上位机设定试验转速,启动轮毂电机,观测各轮转速并调整输入电压使其达到设定的试验转速。⑦开机记录,试验持续时间 20 s 左右。

⑧试验结束，按下按钮，停止底盘转动，等待所有传感器回 0 后，开始下一次试验。每一试验重复 5 次。

4　试验结果与分析

4.1　轮毂电机转速与驱动电流测试

启动柔性底盘的 4 个轮毂电机，各传感器的信号从零增加到稳态的过程如图 8 所示。在不同转速条件下，柔性底盘各轮毂电机转速从零增加到设定速度的过程基本类似，随着柔性底盘轮毂电机的驱动信号发出，各电动轮的转速和电流在 2 ~ 3 s 内由零增加到设定的数值。同时柔性底盘轮毂电机的转速大于被驱动的水平转盘的转速 4 ~ 5 r/min。图 8 是设定转速为 55 r/min 的试验结果。

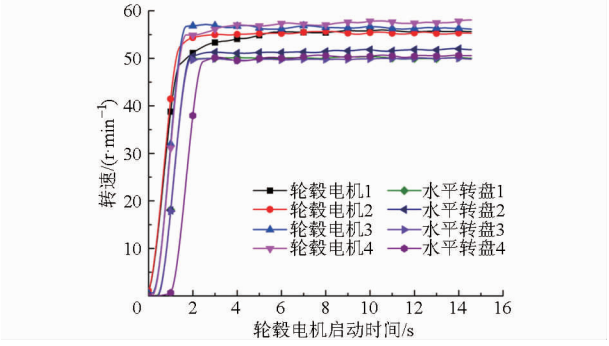


图 8　轮毂电机和水平转盘的转速

Fig. 8　Curves of wheels' rotation speed

图 9 是 4 个轮毂电机的驱动电流，从图 9 可以看出，各轮毂电机的驱动电流在 3.5 ~ 3.9 A 之间波动，当柔性底盘运行平稳后，各轮的驱动电流也趋于稳定。

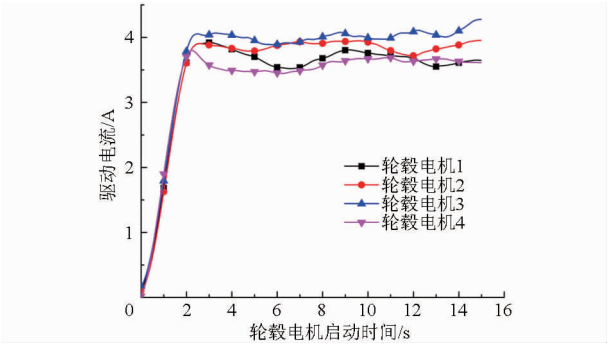


图 9　轮毂电机驱动电流

Fig. 9　Curves of wheels' currents

4.2　直行试验

模拟直行试验测得的 4 个力传感器输出曲线如图 10 所示。纵向布置的力传感器 a 和 b 用于测量车架的侧向横摆力，从图中可以看出，其中传感器 a 的输出 F_a 在 4 s 内由 0 逐渐增大到 137 N 左右，传感器 b 的输出 F_b 增加到 92 N 左右，并在该值上下变动，2 个传感器的合力在 229 N 上下变化；横向布置的力传感器 c 和 d 用于测量行进方向的牵引力，其中传感器 c 的输出 F_c 在 4 s 内从 0 变化到 −531 N，传感器 d 的输出 F_d 变化到 −594 N 左右，并在该值上下变动，2 个传感器的合力在 −1 125 N 上下变化。

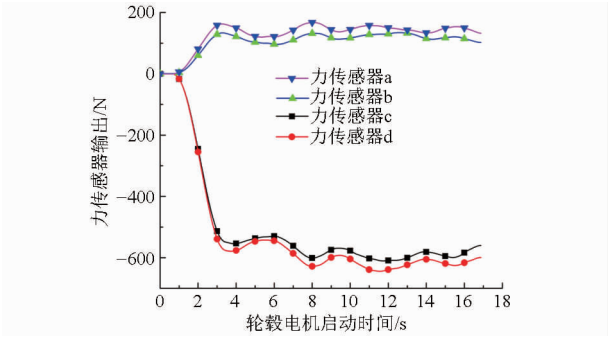


图 10　直行时力传感器的输出曲线

Fig. 10　Output curves of force sensors for up-down motion

直行时，在水平方向上柔性底盘的受力状态如图 11 所示。用 F_1、F_2、F_3 和 F_4 分别表示各水平转盘对轮毂电机 1、2、3 和 4 轮胎的水平推力，另外，由于轮毂电机和水平转盘在轮胎接触中心处存在相对运动，所以在每个车轮的接触处存在与运动方向 y 垂直的 x 方向分布摩擦力，其大小和方向如图 11b 所示，x 方向的分布摩擦力可以合成一个力矩，但由于 4 个车轮采用对称布置，所以该摩擦力矩相互抵消，对底盘的影响可以忽略不计。从 4 个力传感器的测量结果可以看出，在轮毂电机设定转速 55 r/min 条件下，左侧轮毂电机的驱动力较小，右侧轮毂电机 2 和 3 的驱动力大于左侧轮毂电机 1 和 4，使得传感器 d 的压力 F_d 较大，同时产生一个逆时针方向的力矩。

可以设想，在此状态下，尽管设定各轮转速相等，如果柔性底盘脱离试验台，将会向左转弯行驶。因此，要实现柔性底盘的定速直线行驶，就要减小右侧轮毂电机的驱动电流。

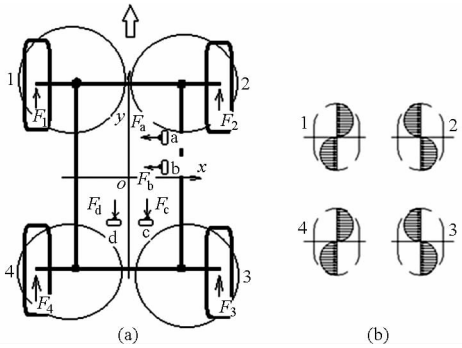


图 11　柔性底盘直行受力分析

Fig. 11　Forces analysis of flexible chassis running up-down

为了验证该试验结果，又分别进行了转速为 50、80、110、150 r/min 的直行试验，所测得的 4 个力传感器结果如表 3 所示。从表中的数值可以看出，

不同转速下各力传感器的输出值不同,但是 4 个传感器输出值与上述规律一致,底盘产生一个逆时针方向的力矩,显示右侧轮毂电机的驱动力较左侧的大。究其原因,是各水平转盘制造过程中的阻力误差和各轮毂电机的性能误差以及系统结构误差等样机制造过程的误差所致,因此需要针对实际运行状态制定控制策略,这也正是底盘在路面和田间行驶肯定要遇到的问题,而且差异程度更大,因此需要柔性底盘控制系统实时监控和调整。

表 3 轮毂电机不同转速下力传感器的输出

Tab. 3 Values of force sensors at different setting rotation speeds

底盘姿势	转速/(r·min^{-1})	力传感器 a/N	力传感器 b/N	力传感器 c/N	力传感器 d/N	F_x/N	F_y/N
直行	50	136.38	92.29	-530.77	-593.84	1 124.61	228.67
	80	168.67	116.63	-467.19	-698.75	1 165.94	285.30
	110	154.65	106.99	-537.05	-560.03	1 097.08	261.64
	150	181.32	111.33	-505.87	-632.49	1 138.36	292.65
	平均值	160.26	106.81	-510.22	-621.28	1 131.50	267.07
	标准差	16.70	9.05	27.44	51.55	24.83	24.95
90°横行	50	-593.72	-554.76	136.48	155.48	-291.96	1 148.48
	80	-623.94	-556.86	146.79	165.87	-312.66	1 180.80
	110	-608.51	-549.57	142.46	155.94	-298.40	1 158.08
	150	-616.42	-558.62	136.31	146.18	-282.49	1 175.04
	平均值	-610.65	-554.95	140.51	155.87	-296.38	1 165.60
	标准差	11.20	3.39	4.39	6.96	10.97	12.94

注:力传感器的正值表示拉力,负值表示压力。

4.3 横行试验

模拟 90°横行试验是将偏置转向轴旋转 90°后锁紧电磁摩擦锁,启动轮毂电机进行试验,模拟柔性底盘 90°横向行驶时的运动形式,这也是柔性底盘区别于普通刚性底盘独有的运动形式。在 90°横行运行模式下,4 个力传感器的输出曲线如图 12 所示。从图中可以看出,90°横行试验与直行试验传感器的输出结果规律类似,只是 2 组传感器扮演的角色发生了转变,纵向布置的传感器 a 和 b 用于测量牵引力,横向布置的传感器 c 和 d 用于测量底盘的横摆力。图 13 为底盘的受力分析示意图。根据数据记录结果,力传感器 a 的输出 F_a 在 -594 N 上下变动,传感器 b 的输出 F_b 在 -555 N 上下变动,2 个传感器的合力达到 -1 149 N;力传感器 c 的输出 F_c 在 136 N 上下变动,传感器 d 的输出 F_d 在 155 N 上下变动。

同样如图 13b 所示,在 4 个车轮接触中心处的

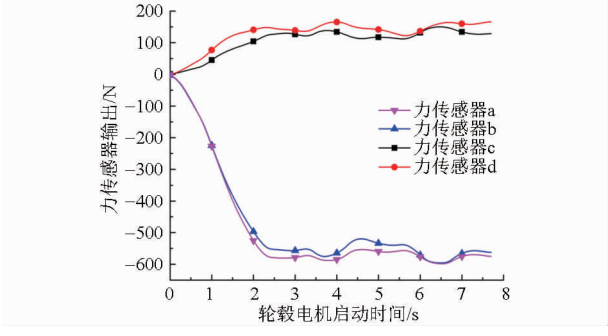


图 12 90°横行时力传感器输出曲线

Fig. 12 Output curves of force sensors for left-right motion

y 方向摩擦力和摩擦力矩分布,由于结构的对称特性,对底盘的影响可以忽略不计。

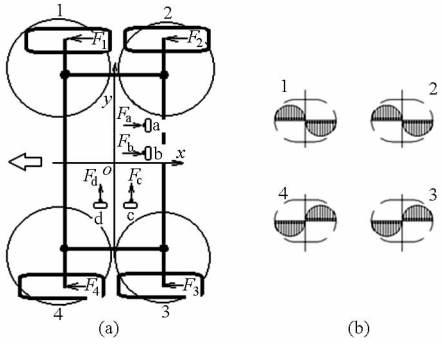


图 13 柔性底盘 90°横行受力分析

Fig. 13 Force analysis of flexible chassis running left-right

从上述试验数据可以看出,柔性底盘 90°横向行驶时,左侧轮毂电机 3 和 4 的驱动力大于右侧轮毂电机 1 和 2。使得柔性底盘产生一个顺时针方向的力矩,因此柔性底盘具有向右转向的运动趋势。为了进一步验证,在设定转速 50、80、110、150 r/min 条件下模拟 90°横行试验,测得的数据如表 3 所示,其规律基本相同。

结合直行和 90°横行模拟试验结果,可以得到:在设定转速条件下,轮毂电机 3 的驱动力最大,轮毂电机 1 的驱动力最小,轮毂电机 2 和 4 的驱动力介于中间。为了使柔性底盘 4 个独立驱动的轮毂电机协调运动,必须实时自动调节各轮的驱动电流,才能保证柔性底盘沿设定速度和方向行驶,这也是后续研究的内容。

5　结论

(1)设计的水平转盘式柔性底盘试验台，能够方便地模拟柔性底盘的运动参数测试和模拟试验，该试验台可为柔性底盘控制策略制定提供有力工具。

(2)柔性底盘启动后，转速从零增加到设定速度需要 2 ~ 3 s。

(3)柔性底盘直行的牵引力可以达到 1 132 N 左右，90°横行牵引力可以达到 1 165 N 左右。

(4)在设定运行速度条件下，所试制的柔性底盘运行时，轮毂电机 3 驱动力最大，轮毂电机 1 驱动力最小，轮毂电机 2 和 4 居中。

(5)柔性底盘运行过程中，需要实时自动调节驱动电流，保证柔性底盘各轮毂电机协调驱动。

参　考　文　献

1　路敌. 温室作业机的柔性底盘及其控制系统的研究与开发 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2011.

2　路敌, 郭康权. 柔性底盘的转向运动模型 [J]. 农机化研究, 2011, 33(4): 219 - 222.
Lu Di, Guo Kangquan. Divert cal motion model of flexible chassis [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(4): 219 - 222. (in Chinese)

3　Schupbach R M, Balda J C. A versatile laboratory test bench for developing power trains of electric vehicles [C]//2002 IEEE 56th Vehicular Technology Conference,2002,3:1666 - 1670.

4　郭孔辉, 丁金全, 许男, 等. 汽车惯性参数测量试验台运动学分析与计算方法 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 1 - 6.
Guo Konghui, Ding Jinquan, Xu Nan, et al. Kinematic analysis and calculation of automobile inertial parameters measuring device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 1 - 6. (in Chinese)

5　陈晓明. 电动汽车试验台测控系统研究与开发 [D]. 西安:长安大学, 2006.

6　Alcala I, Claudio A, Guerrero G. Test bench to emulate an electric vehicle through equivalent inertia and machine DC[C]//11th IEEE International Power Electronics Congress, 2008: 198 - 203.

7　Lungoci C, Bouquain D, Miraoui A, et al. Modular test bench for a hybrid electric vehicle with multiples energy sources [C]// 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment,2008:299 - 306.

8　罗禹贡, 李深, 周磊, 等. 电动汽车复合制动动态试验台的研发[J]. 汽车工程, 2012, 36(4): 351 - 355.
Luo Yugong, Li Shen, Zhou Lei, et al. The development of dynamic test bench for EV hybrid brake system [J]. Automotive Engineering, 2012, 36(4): 351 - 355. (in Chinese)

9　郭啸峰, 吴森. 轮毂电机式电动汽车试验台的设计与实验 [J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版, 2013, 35(6): 859 - 862,874.
Guo Xiaofeng, Wu Sen. Design and experiment study of test bench for in-wheel motor electric vehicles [J]. Journal of Wuhan University of Technology:Information & Management Engineering, 2013, 35(6): 859 - 862,874. (in Chinese)

10　He Hongwen, Sun Fengchun, Jie Xing. Dynamic simulation and experiment of electric drive system on test bench [C]//2007 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety,2007:1 - 4.

11　梅娜, 郭康权, 路敌, 等. 柔性底盘驱动控制系统设计 [J]. 农机化研究, 2010, 32(4): 112 - 113,122.

12　杨露, 郭康权, 丁新民. 基于电桥电路的温室作业柔性底盘转向控制系统的设计 [J]. 农机化研究, 2013, 35(9): 151 - 155.
Yang Lu, Guo Kangquan, Ding Xinmin. The steering control system design of flexible chassis for conservatory work based on bridge circuit[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(9): 151 - 155. (in Chinese)

13　西北农林科技大学. 一种四轮独立驱动独立转向底盘试验装置: 中国, 2013202573742 [P]. 2013 - 05 - 13.

14　谭建成. 永磁无刷直流电机技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 2013.

15　吕威, 郭孔辉, 张建伟. 电动助力转向综合前馈和模糊 PID 反馈的电流控制算法 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 10 - 15.
Lü Wei, Guo Konghui, Zhang Jianwei. Feed-forward integrated with fuzzy PID feedback current control algorithm in electric power steering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 10 - 15. (in Chinese)

16　张为春, 曾祥军. 基于模糊 PID 控制的汽车底盘模拟测功机测控系统 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(12): 17 - 19,45.
Zhang Weichun, Zeng Xiangjun. Research on vehicle chassis dynamometer of MCG - 200 based on fuzzy-PID [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12): 17 - 19, 45. (in Chinese)

17　陈文科, 陈志, 王志, 等. 万向电动底盘控制系统设计 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 19 - 23,34.
Chen Wenke, Chen Zhi, Wang Zhi, et al. Control system design of omni directional electric chassis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 19 - 23, 34. (in Chinese)

18　孟庆华, 许进, 王东峰. 轮毂电机驱动型电动汽车动力系统研究 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 33 - 37,20.
Meng Qinghua, Xu Jin, Wang Dongfeng. Power system of electric vehicle driven by in-wheel motors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 33 - 37, 20. (in Chinese)

19　张小龙, 潘登, 盛丹丹, 等. 新标准下汽车平顺性虚拟道路试验系统与评价方法 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 45 - 51.
Zhang Xiaolong, Pan Deng, Sheng Dandan, et al. Virtual roadway test system and valuation method for vehicle ride comfort based on new test regulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 45 - 51. (in Chinese)

20　张小龙, 潘登, 姜山, 等. 基于加速度的汽车悬架位移实时测试方法试验研究 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 15 - 22.
Zhang Xiaolong, Pan Deng, Jiang Shan, et al. Experiment on real-time test method for automotive suspension distance based on acceleration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 15 - 22. (in Chinese)