

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.035

拖拉机轮胎中心位置通用传感器安装支架设计与试验*

张小龙¹ 李亮² 陈彬¹ 曹成茂¹

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

【摘要】 根据拖拉机动力学测试与控制系统开发的需要,确定了在拖拉机轮胎中心位置安装通用传感器的支架设计技术要求,并进行了结构优化设计。设计的支架总质量 1.815 kg,轴向尺寸可调节,保证了支架主平面安装时与轮胎旋转平面平行且其旋转中心与轮胎中心对齐。有限元分析表明,在最坏 H 级路面、车速 90 km/h、垂直冲击和旋转载荷输入下支架最大变形量小于 0.2 mm,不会增加传感器因安装造成的测量误差。设计了道路试验系统,通过试验验证了支架工作的可靠性。为中小规模农田机械化作业中对拖拉机进行导航辅助驾驶,和拖拉机运动特性测试中在轮胎中心安装传感器提供了有效手段。

关键词: 拖拉机 轮胎 传感器 支架设计 道路试验

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)09-0190-07

Design of General Sensor Installation Bracket on Tractor Tire Center Position

Zhang Xiaolong¹ Li Liang² Chen Bin¹ Cao Chengmao¹

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract

For effective completion of tractor dynamics test and developing its control units, the technology requirements for general sensor installation bracket on tire center position was firstly determined, then the detailed structure was optimized and processed. The designed mass of bracket was 1.815 kg and its axial length could be adjusted. The designed structure ensured that the principal plane of bracket was parallel to the tire rotary plane and its rotation center was aligned with the tire rotation center. The finite-element simulation analysis showed that the max deformation of the bracket was less than 0.2 mm when loaded with vertical and rotation inertial forces at speed of 90 km/h on the worst H level road, so it could not add systematical error on the measurement data. A roadway test system was developed and the reliability of the bracket was verified by the systematical roadway tests. This research provided a general and effective means to study the measurement problem on the rotation tire center, such as tractor assistant driving navigation system for mechanized working in small or medium scale farmland, tractor tire dynamics test, and so on.

Key words Tractor, Tire, Sensor, Bracket design, Roadway test

引言

拖拉机是农田作业机具的动力源,对拖拉机进

行低成本、高可靠性的导航有助于提高农田作业的精准性和作业效率,降低驾驶疲劳强度,以满足一定规模机械化作业的需求。

收稿日期: 2012-04-26 修回日期: 2012-05-17

* 国家自然科学基金资助项目(51105001)和安徽省高等学校省级自然科学研究重点资助项目(KJ2011A101)

作者简介: 张小龙,副教授,主要从事农业机械导航理论与装备研究,E-mail: sunshine.lzh@gmail.com

通讯作者: 曹成茂,教授,博士,主要从事智能检测与控制技术研究,E-mail: caochengmao@sina.com

当前对农田作业拖拉机导航主要基于 GPS 技术,如美国 Trimble 公司研究的全系列产品,在我国东北一些农场得到了规模应用^[1]。加拿大 NovAtel 公司也在积极拓展精细农业应用市场^[2]。

目前主流拖拉机导航产品主要基于 GPS 卫星发射的 C/A 测距码及其载波信号相位信息实现 3 m CEP精度的绝对定位,或基于自行架设的基准站或星际差分服务实现更高精度的相对定位,如双频载波相位差分相对定位精度 2 cm CEP,单频载波相位差分 20 cm CEP,伪距差分 40 cm CEP,星际差分 2~40 cm^[3-5]。按照此种方案实现拖拉机导航,数据更新速率 20 Hz 以上,仅 GPS 接收机和 GPS 天线购置就需 10~20 万元,如果配以执行机构和控制系统,其投入超过 30 万元。目前一般作业采用的 50 kW 拖拉机市场价格在 10 万元左右。对于中小规模农田机械化作业,基于 GPS 的导航辅助驾驶方案不可行。

笔者提出将拖拉机轮速作为主信号,以车身加速度和横摆角速度作为辅助信号实现拖拉机驾驶辅助导航的方案,并基于高精度 GPS 测量信息验证方案中理论建模和控制方法的精确性和实时性。本文对轮速传感设备安装支架和轮速获取方式加以研究。

1 总体结构与功能确定

轮胎的主要作用是支撑车体,缓冲地面对车体的振动冲击。轮胎表面花纹形状影响通过性和动力性(滚动阻力),轮胎拖距和前轮定位值影响转向操作特性,特别是轮胎垂直地面方向的传递特性和侧向方向的侧偏特性,影响平顺性和轮胎地面的附着特性。对拖拉机动力学分析与结构参数选型、运行性能试验与评价等均需要获取轮胎的位置姿态信息,包括其振动特性、转动角速度、转向角和侧偏角等。特别是近年来发展起来的轮胎六分力测量技术,这些参数更是轮胎六分力耦合解耦所必需^[6]。

拖拉机行驶过程中,轮胎是旋转件。精确获取轮胎位置姿态信息的最直接方式是将传感器安装在轮辋中心位置处。图 1 所示为设计的安装支架,4 个夹紧套管两端分别与轮胎螺栓和端螺栓连接柱相连,并通过其上的螺栓拧紧夹固。四槽法兰盘通过 4 个法兰盘垫片与端螺纹连接柱连接,同时支架端盘通过 2 个螺栓安装其上。传感器安装在支架端盘上。

支架设计过程中考虑到如下因素和功能:车桥轴向尺寸不能增加过多,四槽法兰盘轴向位置可调,以免影响整车通过性;轻量化设计,尽量减小对原车

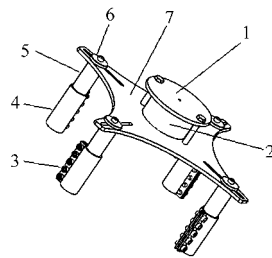


图 1 支架总体结构图

Fig. 1 Structure of designed bracket

1. 支架端盘 2. 端盘挡圈 3. 夹紧螺栓 4. 夹紧套管 5. 端螺纹连接柱 6. 法兰盘垫片 7. 四槽法兰盘

轮振动特性的影响,且能承受车轮运动过程中的振动频率与强度;四槽法兰盘要与车轮旋转平面平行,其旋转中心与车轮旋转中心对齐;支架端盘根据不同的传感器结构灵活设计,以提高其通用性;安装方便、结构可靠,加工工艺简单。

2 外形设计与加工工艺

2.1 端螺纹连接柱与夹紧套管

拖拉机在运动时四槽法兰盘中心线要与轮胎中心线对齐且四槽法兰盘旋转平面与轮胎旋转平面平行,以保证对地高度有特殊要求的传感器(如机器视觉传感器、光学侧偏角传感器)和惯性传感器(如加速度传感器)的安装要求。机器视觉传感器离地高度变化会影响成像清晰程度和特征提取;光学侧偏角传感器安装有最佳高度,超过一定值传感器输出溢出饱和^[7];加速度传感器安装偏离轮胎旋转中心线会造成输出值中有附加的离心加速度和侧向加速度,测量准确性降低。

如图 1 所示,四槽法兰盘通过 4 副连接套件(夹紧套管和端螺纹连接柱)与轮胎螺母相连。连接套件具体结构如图 2 所示。夹紧套管一端卡在轮胎螺母上,另一端卡在端螺纹连接柱无螺纹端,并通过夹紧螺栓使其紧固。端螺纹连接柱有螺纹端通过螺钉与四槽法兰盘相连。这样四槽法兰盘与轮胎螺母之间通过刚性连接达到了紧固效果,连接松紧程度可调节,且在路况差的路面试验时可以增大两者之间的接触面积,增加刚性连接效果。

当轮胎螺母型号不同时,所对应夹紧套管尺寸也不同。以 M16 轮胎螺母为例:查文献[8]得 M16 螺母公称宽度 $s = 24$ mm,外接圆直径 $e = 26.75$ mm,螺母厚度 $m = 14.8$ mm。夹紧套管内孔直径和端螺纹连接柱外圆直径均取 26.7 mm,夹紧套管的厚度取 3 mm,端螺纹连接柱的厚度取 4 mm。

夹紧套管和端螺纹连接柱的材料要具有一定的刚度,选择综合性能较优良的 45 号钢。45 号钢管含碳量在 0.45% 左右,含有少量的锰、硅等,硫磷含

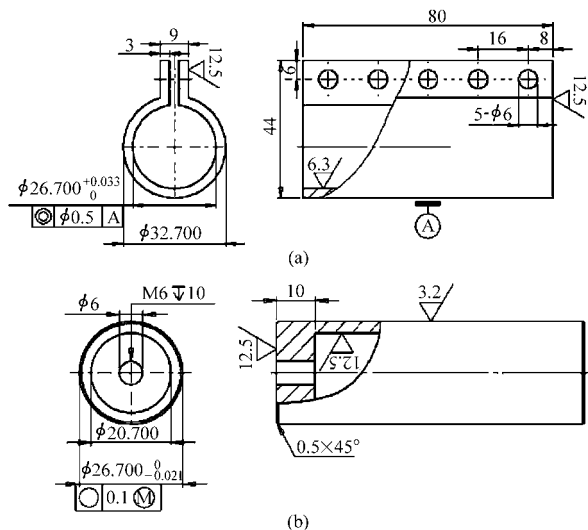


图2 连接套件结构图

Fig. 2 Structure diagram of connection kit

(a) 夹紧套管尺寸图 (b) 端螺纹连接柱尺寸图

量较低,是广泛应用的结构用钢,硬度不高易切削加工。对于夹紧钢管的加工,选择线切割加工工艺,加工精度较高,然后淬火回火热处理。

2.2 四槽法兰盘和支架端盘

法兰盘通过螺钉与端螺纹连接柱有螺纹端连接。在法兰盘上开出长度和宽度一定的沟槽以便于与不同轮辋相匹配。基于实际轮辋尺寸,将槽的分布圆周半径定为 400 mm 和 210 mm。轮胎螺母一般是偶数个均匀分布,在法兰盘上开出均布的 4 个直槽即可实现连接要求。4 个槽在法兰盘上的分布有两种方案:一种是槽中心线过法兰盘半径;一种是槽中心线与法兰盘半径有一定夹角。具体结构如图 3 所示。

拖拉机行驶过程中地面对轮胎的冲击传递到轮胎中心其振动频率达 20 Hz 以上,为减小安装支架对轮胎原有力学特性影响,对支架进行轻量化设计。无夹角槽的工艺较简单,而且具有轻量化优势。表 1 是相同盘进行切除后的面积测算对比,计算基于 SolidWorks 软件工具。由表中可知开无夹角槽的法兰盘比开有夹角槽的法兰盘的质量小 54.3%。本文选用图 3a 的开槽方法,这种开槽方法还易于利用轮胎螺母位置实现法兰盘中心与轮胎中心对齐。

考虑到传感器不同结构和安装要求,在法兰盘的外侧延伸出一个较小的支架端盘用于安装传感器(图 1),以提高支架应用通用性。在法兰盘和安装盘上对应位置开出圆形槽,并设计挡圈镶嵌于法兰盘和安装盘之间,保证两个盘的相对平行。具体结构如图 3c 所示。

另外,在保证法兰盘强度的前提下可在法兰盘圆周和盘心位置切除部分体积以减小法兰盘的质

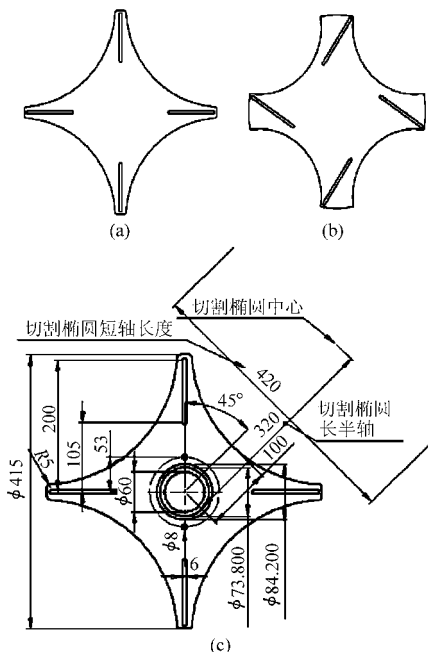


图3 法兰盘结构图

Fig. 3 Structure design of flange plate

(a) 无夹角槽法兰盘 (b) 有夹角槽法兰盘

(c) 无夹角槽法兰盘尺寸

量。法兰盘外圆切割采用了椭圆形曲线切割方法,满足法兰盘由内向外曲率由大变小的特点。采用将椭圆长轴定于两槽之间 45° 线上的方法截取法兰盘,具体如图 3c 所示。

表1 法兰盘不同开槽方法结果测算

Tab. 1 Size estimation of different slotted flange plates

参数	无夹角槽	有夹角槽
面积/mm ²	51 232.74	79 047.62
周长/mm	2 131.41	2 112.50

开槽外圆分步直径为 400 mm,法兰盘外圆圆周直径取为 415 mm。端盘挡圈外围直径为 84 mm,厚度为 5 mm,对应法兰盘和端盘上的圆槽尺寸为:外圆直径为 84.2 mm,内圆直径为 73.8 mm,槽深度取 2.5 mm。两个连接螺栓孔分布于直径为 106 mm 的圆上,选择 M8 的螺栓用于连接端盘、端盘挡圈和四槽法兰盘。法兰盘中心开孔的直径取 55 mm。

四槽法兰盘和支架端盘质量较轻,结构易于加工,具体工作时对材料力学性能要求较小,具体选用牌号为 6061 的铝合金板作为加工材料,且后期不需要工艺处理。

2.3 端盘挡圈

端盘挡圈的作用是保证法兰盘和支架端盘平行,对材料力学特性要求低。考虑轻量化设计,材料选用纯铝。考虑到实际安装接触磨损和变形,挡圈的厚度不能过小,采用纯铝柱车削加工方法。

2.4 法兰盘垫片

轮盘上通过开槽来安装螺钉,以提高其通用性。用嵌入槽式的垫片卡在螺钉靠法兰盘的一侧,加垫片以增加接触面积,不会损坏法兰盘,且防止螺钉的自行转动。法兰盘垫片设计如图4所示。

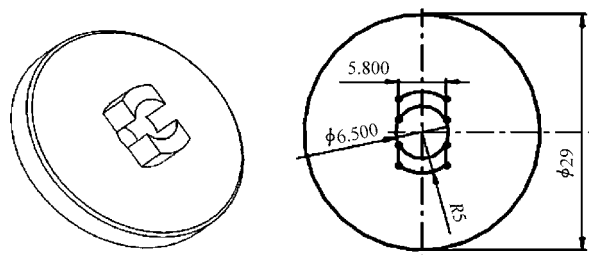


图4 法兰盘垫片结构图

Fig.4 Structure diagram of flange plate's shim

法兰盘的加工材料为6 mm厚的牌号为6061的铝合金板,垫片嵌入轮盘的厚度取5 mm,接触端厚度取4 mm。

2.5 支架与车身间连接件

传感器安装于支架端盘上,通常情况下安装后要求传感器相对位置保持确定。如测量轮胎旋转角度的角度传感器需要让角度传感器基体相对于车身不能有角运动;测量轮胎侧偏角的光学传感器,要求传感器敏感方向与地面保持垂直。因此需要一个实现支架与车身间连接的装置,其一端与传感器基体固定,另一端与车身固定。考虑到转向轮转向和悬架变形,该连接装置自身组件间可以适度转动和伸缩。

采用内部穿孔的球头销来实现连接装置内部组件间的相对运动。连接装置与车身间的连接采用真空吸盘方式。

3 基于有限元法的支架强度校核

基于最差路面的垂直和旋转运动激励,计算惯性力,并假设该激励直接作用于支架上。采用有限元法分析支架最大位移量和位移位置,确定支架的强度和有效性。

3.1 施加载荷计算

载荷计算以我国H级公路统计数据为依据^[9]。H级公路的路面不平度均方差为 $\sigma_a = 0.48722$ m,空间频率 n 为 $0.11 \sim 2.83 \text{ m}^{-1}$,分级路面谱频率指数 $W = 2$ 。假设道路路面路表形状为正弦函数,且可表示为

$$y = A \sin(2\pi n u t) \quad (1)$$

式中 y ——垂向位移, m

A ——幅值,取 0.48722 m

u ——车速, m/s t ——时间, s

n ——空间频率,取 2.83 m^{-1}

y 对时间的二阶导数的最大值即为地面对安装支架的最大加速度。基于牛顿第一定律得到施加的载荷 F_{\max} 为

$$F_{\max} = -m A (2\pi n u)^2 \quad (2)$$

所设计的支架测算 $m = 1.815$ kg。当车速分别为30 km/h、60 km/h和90 km/h时,对应 F_{\max} 分别为19.4 kN、77.6 kN和174.6 kN。

3.2 有限元建模与分析

将在SolidWorks软件中设计、装配的支架导入到Abaqus软件中,定义支架材料的属性。简化支架材料为铝合金,密度为 2700 kg/m^3 ,弹性模量和泊松比分别为 $7.2 \times 10^6 \text{ MPa}$ 和0.3。在Interaction模块中定义各个部件连接关系,在螺纹连接处进行了简化。在Load模块中定义约束和载荷,将夹紧套管连接螺钉的一端施加固定约束,给装配体施加体力 F_{\max} 。考虑到旋转运动,同时也增加旋转速度体力载荷。在Mesh模块中对装配体各部件进行网格划分,网格单元选择C3D8R。

仿真分析结果如表2所示,车速90 km/h时整个支架变形仿真截图如图5所示。由表2可以看出:当车辆行驶在最坏的H级路面上且速度为90 km/h时,端盘中心孔的变形量小于0.2 mm,且车轮角速度对端盘中心孔的变形量影响可以忽略不计。支架设计强度足够,不会增加传感器系统测试误差。

表2 H级路面激励支架变形分析结果

Tab.2 Bracket deformation analysis loaded on H level road

激励方式	速度 /km·h ⁻¹	端盘中心孔变形量/mm	最大变形量(螺钉外端)/mm
垂直体力	30	0.020 35	0.021 41
	60	0.081 42	0.085 63
	90	0.183 20	0.192 60
垂直+旋转体力	30	0.020 42	0.021 43
	60	0.081 45	0.085 68
	90	0.183 40	0.193 50

4 试验与分析

加工了4个拖拉机车轮轮胎中心位置传感器安装支架。搭建了实车道路试验系统实现轮胎转速的直接测量,用于验证支架系统工作的可靠性,试验系统结构如图6所示。试验在安徽农业大学校区内机电工程园进行。

增量型编码器型号为ISS 3806-1000-AE,每圈1000个TTL方波。基于英国Racelogic公司的频

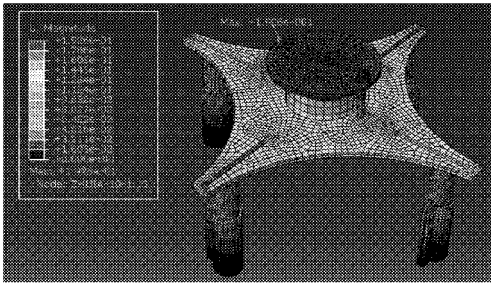


图5 H级路面90 km/h时支架变形有限元分析结果

Fig. 5 Bracket FEM analysis in 90 km/h on H level road

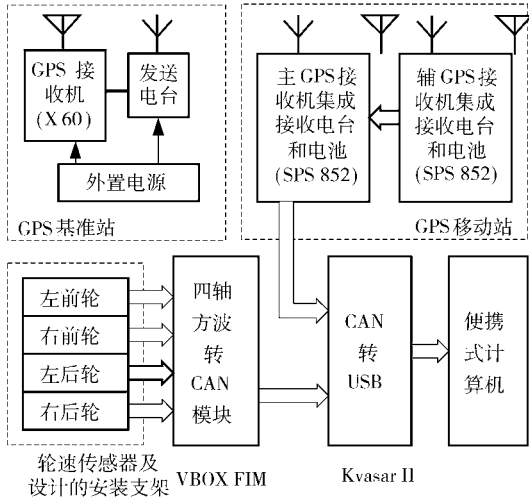


图6 拖拉机道路试验测试系统原理图

Fig. 6 Block diagram of tractor roadway test system

率信号转 CAN 接口数字输出的 FIM03 模块对编码器输出的方波信号进行频率测量,获取车轮旋转角速度信息^[10]。系统中采用了 GPS 测试装置测量的拖拉机前进速度对轮胎滚动半径进行标定,以确定车轮旋转线速度。GPS 测试装置同时完成拖拉机位置和车体方向角的测量,其测试方案如图 6 上侧两虚线框所示。GPS 基准站放置在机电园办公楼楼顶,移动站为两套车载 GPS 接收机及天线,移动站选用美国 Trimble 公司的 SPS 852 接收机及 GA 810 GPS 双频天线。两台接收机均开通了双频功能,其内部集成了电池和数据接收电台。移动站可独立完成定向和速度测量,在基准站提供载波相位差分信息时可同时实现高精度位置测量^[11]。

对移动站 GPS 接收机进行配置,设置位置(GPGGA)、速度(GPVTC)和航向角(GPHDT)信息通过 CAN 通道输出,数据更新频率 20 Hz。

系统选用瑞士 Kvasar 双通道 CAN 转 USB 设备完成对 FIM03 和 GPS 输出的 CAN 信息的同步采集^[12]。其中 GPS CAN 输出波特率为 250 kb/s 的扩展帧^[2],FIM03 CAN 输出波特率为 500 kb/s,数据更新频率为 100 Hz,各车轮测量数据通过不同的 CAN 数据帧的 ID 来区别^[10]。由 PC 机基于 CanKing 软

件完成数据的记录,最后由 Matlab 软件编程对数据进行分析。

图 7 是试验拖拉机及试验系统车上安装图,选用东方红 LX904 型拖拉机,前转向轮轮胎型号是 12.4-28,后驱动轮轮胎型号是 13.6-38。图 8 是一组试验曲线。

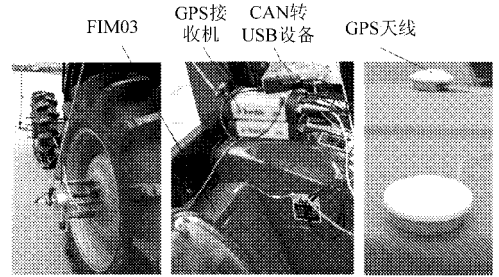


图7 支架和测试设备车上安装图

Fig. 7 Installation diagram of test instrument on tractor

首先基于一小段直线行驶数据(图 8a、8b)确定各车轮的滚动半径为

$$r_i = \frac{1000u_a}{7.2\pi f_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

式中 i ——车轮编号

u_a ——GPS 测得的车速, km/h

f_i ——轮速编码器输出的方波频率, Hz

最终确定的左前轮半径 $r_1 = 0.5173$ m,右前轮半径 $r_2 = 0.5122$ m,左后轮半径 $r_3 = 0.6780$ m,右后轮半径 $r_4 = 0.6776$ m,均比标称的轮胎静态名义半径略小。试验测得的轮胎转动频率数据噪声很大,数据处理时采用了小波滤波的方法,利用 Matlab 函数 wden 编程实现^[5],首先对原始信号进行小波分解,然后对分解得到的高频信号小波系数采用阈值限定等方法进行抑制,最后利用处理后的小波系数进行信号重构。经调试采用小波函数 db5,进行 5 层分解,降噪阈值函数选为 heursure,阈值调整函数参数选为 mln。图 8c~8e 分别是圆周行驶时的由载波相位差分模式 GPS 测得的轨迹、水平定位误差及水平速度曲线,图 8f~8i 分别为 4 个车轮的角速度曲线。图 8 中速度和角速度信息都进行了小波滤波处理。

对比由 GPS 测得的速度曲线(图 8e)和轮速编码器测得的角速度曲线(图 8f~8i)发现,在试验开始后的 15 s 和 34 s 左右车速曲线有明显下滑,而轮速信号仅在 34 s 左右有少量下滑,二者有较大差异。结合试验场地分析发现,在试验场地的南侧有高大而密的排树,西偏北侧有东西方向的三层办公楼,西侧有一层房屋高的门卫房,它们离试验圆周行驶中心不足 30 m。一般情况下 GPS 测速是基于卫星载波信号的多普勒效应,这些障碍物对 GPS 卫星

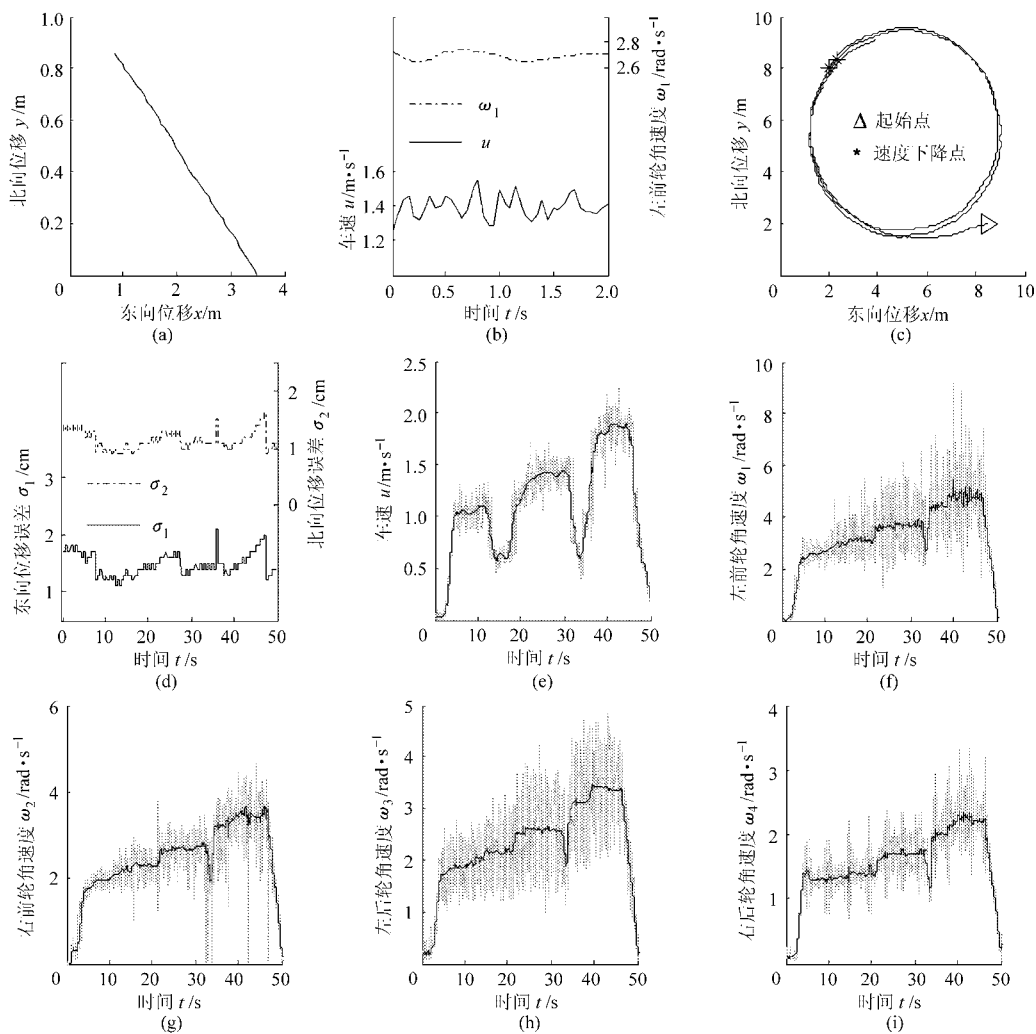


图8 试验曲线

Fig. 8 Curves of tractor test

(a) 直线行驶轨迹 (b) 直线行驶车速和左前轮旋转角速度 (c) 圆周行驶轨迹 (d) 圆周行驶轨迹误差 (e) 圆周行驶车速
(f) 圆周行驶左前轮角速度 (g) 圆周行驶右前轮角速度 (h) 圆周行驶左后轮角速度 (i) 圆周行驶右后轮角速度

信号的遮挡以及较大的多路径效应是造成车速较低时的车速信噪比过小的主要原因。由图8c可以看出,车速下滑点对应的位置基本相同。另外,由图8g可以看出,试验时其轮速编码器安装存在晃动,造成拖拉机减速时轮速瞬时为零的现象。

5 结论

(1) 中小规模农田机械化作业中对拖拉机进行导航辅助驾驶,或对拖拉机运动特性测试等,都需要对轮胎运动学或动力学特性进行有效准确测量,设

计了一种通用的轮胎中心位置传感器安装支架,并通过试验验证了系统工作的可靠性,为解决该类测量问题提供了通用的有效手段。

(2) 研究的支架结构轻巧(质量 1.815 kg),加工工艺简单,轴向尺寸小,结构设计保证了安装时四槽法兰盘与车轮旋转平面平行,其旋转中心与车轮旋转中心对齐。通过有限元分析表明,在最差的H级路面、车速 90 km/h 冲击下支架最大变形量不足 0.2 mm,不会增加传感器因安装造成的测量误差。结构设计通用性好,便于推广使用。

参 考 文 献

- 1 伟利国,张权,颜华,等. XDNZ630 型水稻插秧机 GPS 自动导航系统[J]. 农业机械学报,2011, 42(7): 186 ~ 190.
Wei Ligu, Zhang Quan, Yan Hua, et al. GPS automatic navigation system design for XDNZ630 rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 186 ~ 190. (in Chinese)
- 2 NovAtel Inc. Smart-mr10/15 user manual [M]. Rev 5. 2011.
- 3 何勇,葛晓锋,俞海红,等. 农用 GPS 测试精度分析及提高精度方法的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 168 ~ 171.

- He Yong, Ge Xiaofeng, Yu Haihong, et al. Analyses of measurement precision of GPS for agricultural purposes and method for improving precision [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 168 ~ 171. (in Chinese)
- 4 周俊, 张鹏, 宋百华. 农业机械导航中的 GPS 定位误差分析与建模[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 189 ~ 192.
Zhou Jun, Zhang Peng, Song Baihua. Analysis and modeling of GPS positioning error for navigation of agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 189 ~ 192. (in Chinese)
- 5 张小龙, 李亮, 李红志, 等. 汽车稳定性控制系统侧偏角道路试验测试系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 1 ~ 5.
Zhang Xiaolong, Li Liang, Li Hongzhi, et al. Sideslip angle roadway test system for vehicle stability control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 1 ~ 5. (in Chinese)
- 6 Martin Herrmann, Dieter Barz, Wolfgang Evers, et al. An evaluation of the mechanical properties of wheel force sensors and their impact on to the data collected during different driving maneuvers [C]. SAE Paper 2005 - 01 - 0857, 2005.
- 7 Kistler Automotive GmbH. Corveit S - 350 non-contact optical sensors, type CS350A [M]. 2011.
- 8 吴宗泽, 罗圣国. 机械设计课程设计手册 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 9 GB/T 7031—2005 机械振动道路路面谱测量数据报告 [S]. 2005.
GB/T 7031—2005 Mechanical vibration-road surface profiles-reporting of measured data [S]. 2005. (in Chinese)
- 10 Racelogic Ltd. Frequency input module RLVBFI03 instruction manual [M]. 2010.
- 11 Trimble Navigation Limited. Getting started guide-Trimble SPS852 modular GPS receiver [M]. ver 4. 41A. 2011.
- 12 Kvaser A B. Kvaser USBcan II user's guide [M]. 2010.

~~~~~

(上接第 178 页)

- 8 Yingda Dai, Konishi M, Imai J. A cooperative motion control of 2-DOF robot arms by neuro-evolved agents [C] // ICICIC '07, Second International Conference on Innovative Computing, Information and Control, 2007: 109 ~ 111.
- 9 孙迪生, 王炎. 机器人控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- 10 Thomas Herold, David Franck, Enno Lange, et al. Extension of a D-Q model of a permanent magnet excited synchronous machine by including saturation, cross-coupling and slotting effects [C] // 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2011: 1 363 ~ 1 367.
- 11 Wang Can, Sun Dong. A synchronization control strategy for multiple robot systems using shape regulation technology [C] // 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2008 WCICA, 2008: 467 ~ 472.
- 12 Zhao D, Li S, Gao F, et al. Robust adaptive terminal sliding mode-based synchronized position control for multiple motion axes systems [J]. IET Control Theory & Applications, 2009, 3(1): 136 ~ 150.
- 13 O-Shin Kwon, Seung-Hoe Choe, Hoon Heo. A study on the dual-servo system using improved cross-coupling control method [C]. 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2011: 1 ~ 4.
- 14 刘金琨. 机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

~~~~~

(上接第 189 页)

- 16 冯建辉, 杨玉静. 基于灰度共生矩阵提取纹理特征图像的研究 [J]. 北京测绘, 2007(3): 19 ~ 22.
Feng Jianhui, Yang Yujing. Study of texture images extraction based on gray level concurrence matrix [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2007(3): 19 ~ 21. (in Chinese)
- 17 张鹏. 基于主成分分析的综合评价研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 24 ~ 26.
Zhang Peng. Research on synthetic evaluation based on principal component analysis [D]. Nanjing: Nanjing University of Science Technology, 2004: 24 ~ 26. (in Chinese)
- 18 冈萨雷斯. 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 152 ~ 158.
- 19 Castleman K R. 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 513 ~ 515.
- 20 张铮, 王艳平, 薛桂香. 数字图像处理与机器视觉——Visual C 与 Matlab 实现 [M]. 人民邮电出版社, 2010: 287 ~ 293.
- 21 李先锋, 朱伟兴, 纪滨, 等. 基于特征优化和 LS-SVM 的棉田杂草识别 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 168 ~ 172.
Li Xianfeng, Zhu Weixing, Ji Bin, et al. Weed identification based on features optimization and LS-SVM in the cotton field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 168 ~ 172. (in Chinese)