

农业机械自动导航车轮转角测量误差补偿模型^{*}

王 鹤^{1,2} 胡静涛^{1,2} 高 雷^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对农业机械自动导航中,把主销转角当作车轮转角来测量会造成测量误差的问题,通过对农业机械前轮转向结构的分析,建立了一种车轮-主销转角关系模型,该模型能够补偿把主销当作车轮转角来测量的误差,提高在农业机械自动导航时车轮转角的测量精度。仿真、试验并在雷沃 M800 型拖拉机上实际应用表明,该模型具有较好的合理性和准确性,车轮转角测量的平均误差减小了 0.48°,最大误差减小了 0.71°,提高了农业机械自动导航系统的性能。

关键词: 农业机械 自动导航 车轮转角 误差补偿

中图分类号: S237; U463.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0033-05

引言

随着精准农业的快速发展,农业机械(以下简称农机)自动导航技术得到越来越广泛的应用^[1-5]。在农机自动导航中,车轮转角测量精度是影响导航控制精度的重要因素之一。

在农机自动导航中,研究人员一般采用两种方法对车轮转角进行测量。一种是间接测量的方法,利用电位器测量车轮转角^[6-8]。另一种是直接测量的方法,认为车轮转角与主销转角相等,采用角度传感器直接测量农机主销转角^[9-14]。

采用间接测量车轮转角的方法虽然可以满足转角精度要求,但是标定工作繁琐、测量仪器价格昂贵。因为直接测量方法简单实用,近年来研究人员多采用直接测量的方法对车轮转角进行测量。但是,直接测量方法也有其缺点:这种方法认为车轮转角和主销转角相等,没有分析两者之间的关系。本文以雷沃 M800 型拖拉机为研究平台,根据主销倾角的定义,建立车轮转角和主销转角的关系模型,理论分析主销倾角对车轮转角测量的影响,通过试验验证模型的正确性和可靠性,并应用在农机自动导航中车轮转角测量上。

1 车轮-主销转角关系模型

为了保持车辆直线行驶的稳定性 and 转向轻便性,减小轮胎与机件间的磨损,主销轴需要倾斜一定的角度。如图 1a 所示,从车辆前后方向看轮胎时,

主销轴向车身内侧倾斜,该角度称为主销内倾角。如图 1b 所示,从车辆的侧面看,主销轴与通过轮胎中心的垂线之间形成一个夹角,即主销后倾角^[15]。

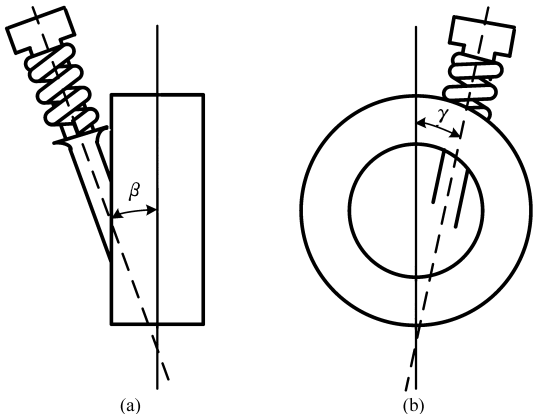


图 1 主销内倾角和主销后倾角

Fig. 1 Kingpin inclination angle and kingpin caster angle

(a) 内倾角 (b) 后倾角

由于主销倾角的存在使得车轮转角和主销转角不相等,在采用直接测量的方法时会造成误差。根据主销倾角的定义,在不考虑轮胎变形、农机转向机构精度等因素的影响,可建立如图 2 所示的模型。

在图 2a 中, O 为车轮轴线与主销轴交点; OO_1 为主销轴; X 轴经过 O 点,与车轮轴重合; Y 轴经过 O 点,指向农机直线行驶的前进方向; Z 轴经过 O 点,垂直于面 YOX ; β 为主销内倾角; γ 为主销后倾角; ϕ 为主销轴与水平面的夹角,称为综合倾角;令 O 点到 O_1 点 3 个方向的距离分别为 a 、 b 、 c ,则

收稿日期: 2013-08-28 修回日期: 2013-10-07
^{*} 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA040403)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B06)
作者简介: 王鹤,博士生,主要从事农机导航关键技术研究,E-mail: wanghe@sia.cn
通讯作者: 胡静涛,研究员,博士生导师,主要从事农机自动导航研究,E-mail: hujingtao@sia.cn

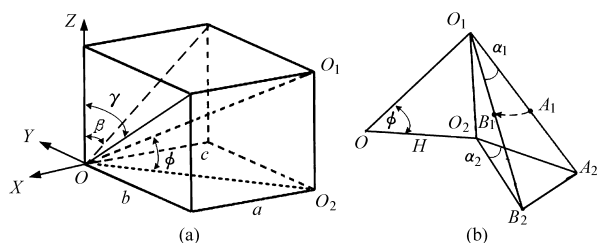


图2 车轮转角与主销转角模型

Fig. 2 Wheel turning angle and kingpin turning angle

(a) 车轮转角 (b) 主销转角

$$\tan\phi = \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (1)$$

由 $\tan\beta = \frac{a}{c}$ 和 $\tan\gamma = \frac{b}{c}$ 得

$$\begin{cases} a = c \tan\beta \\ b = c \tan\gamma \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中得

$$\tan\phi = \frac{1}{\sqrt{\tan^2\beta + \tan^2\gamma}}$$

$$\phi = \arctan \frac{1}{\sqrt{\tan^2\beta + \tan^2\gamma}} \quad (3)$$

图2b中,设主销轴 OO_1 交水平面 H 于 O , O_1O_2 垂直水平面 H 于 O_2 , O_1A_1 为垂直于主销轴 OO_1 的任意一条线段。 O_1A_1 绕主销轴 OO_1 转动任意角度至 O_1B_1 , 延长 O_1A_1 和 O_1B_1 交水平面 H 于 A_2 和 B_2 , 连结 O_2A_2 和 O_2B_2 。则 $\angle A_2O_1B_2$ 为主销转角, 记作 α_1 。根据平移的性质, $\angle A_2O_1B_2$ 在水平面 H 上的投影角 $\angle A_2O_2B_2$ 为车轮转角, 记作 α_2 。为了分析方便, 定义线段 O_1A_1 在面 OO_1O_2 上时主销转角 α_1 为零。根据空间几何可证明 $B_2A_2 \perp A_2O_1$, $B_2A_2 \perp A_2O_2$ 。

在直角三角形 $\triangle A_1O_1B_1$ 和 $\triangle A_2O_2B_2$ 中

$$\tan\alpha_1 = \frac{l_{A_2B_2}}{l_{A_2O_1}} \quad (4)$$

$$\tan\alpha_2 = \frac{l_{A_2B_2}}{l_{A_2O_2}} \quad (5)$$

在直角三角形 $\triangle O_1A_1A_2$ 中

$$l_{A_2O_1} \sin\phi = l_{A_2O_2} \quad (6)$$

在式(4)、(5)、(6)中, $l_{A_2B_2}$ 为线段 A_2B_2 的长度, $l_{A_2O_1}$ 为线段 A_2O_1 的长度, $l_{A_2O_2}$ 为线段 A_2O_2 的长度。由式(4)、(5)、(6)可得车轮-主销转角的关系模型

$$\alpha_2 = \arctan \left(\frac{\tan\alpha_1}{\sin\phi} \right) \quad (7)$$

对于不同类型的农机, 其主销倾角会有所不同。代入不同的主销倾角对式(7)进行仿真分析, 仿真的最大车轮转角为 45° , 得到车轮转角 α_2 与主销转角 α_1 之间的偏差曲线, 如图3所示。

从图3中可以看出, 车轮与主销之间的角度差

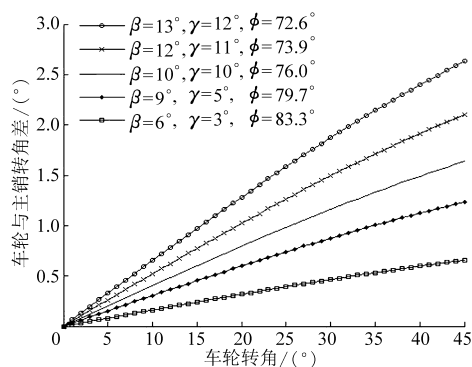


图3 角度差和车轮转角的关系曲线

Fig. 3 Angle difference between wheel and kingpin vs wheel turning angle

不但随车轮转角的增大而增大, 而且也随主销内、后倾角的增大而增大。在车轮的极限位置时, 车轮与主销之间的误差达到最大。为了能够统一观察主销倾角的影响, 把综合倾角 ϕ 作为自变量, 车轮与主销转角误差随综合倾角的仿真曲线如图4所示。

图4表明车轮与主销之间的角度差随综合倾角的增大而减小, 当综合倾角为 90° 时, 即主销轴垂直于水平面, 误差达到最小。当综合倾角小于 80° 时, 车轮与主销的角度误差较大, 误差超过了 1° ; 而当综合倾角大于 80° 时, 车轮与主销的角度误差较小, 最大误差不超过 1° 。这样可以通过综合倾角的大小来判断主销倾角对测量车轮转角的影响。综合倾角大于 80° 时, 主销倾角影响小, 可以认为车轮与主销转角相等; 在综合倾角小于 80° 的情况下, 主销倾角影响大, 不能直接把主销转角当作车轮转角来测量。

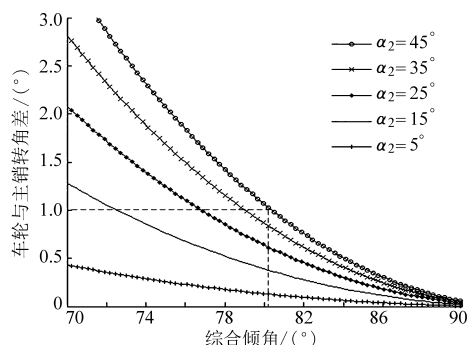


图4 角度差和综合倾角的关系曲线

Fig. 4 Angle difference between wheel and kingpin vs the integrated angle

2 模型验证

2.1 试验装置

为检验本文所建模型的正确性, 搭建了车轮转角试验平台。试验装置包括: 雷沃 M800 型拖拉机、SPZJ-1 型汽车转向角检测仪、GAS60 型角度传感器、便携式计算机、RS485 转 USB 模块、RS232 转

USB 模块。角度传感器测量主销转角,汽车转向角检测仪直接测量车轮转角。便携式计算机通过 RS485 转 USB 模块采集角度传感器的数据,同时通过 RS232 转 USB 模块采集汽车转向角检测仪的数据。主要试验装置如图 5 所示。



图 5 主要试验装置
Fig. 5 Main testing equipment

1. 雷沃 M800 型拖拉机 2. SPZJ-1 型汽车转向角检测仪
3. GAS60 型角度传感器

SPZJ-1 型汽车转向角检测仪由左、右对称的机械台架和电控箱组成。电控箱完成对台架的控制、数据采集,检测结果显示,通过 RS232 的通讯方式输出检测数据。机械台架主要由电动机、减速器、检测盘等组成。检测盘中心轴可沿左、右、前、后 4 个方向自由运动,移动范围为 $\Phi 80\text{ mm}$ 。检测盘转向安装有高精度角度传感器,当检测盘转动时,角度传感器角信号输送给电控箱。

测量主销转角的角度传感器在拖拉机前桥上的具体固定形式如图 6 所示。角度传感器固定在支架上,其旋转轴通过联轴器与主销轴对接。支架利用两块夹板固定在前桥上。

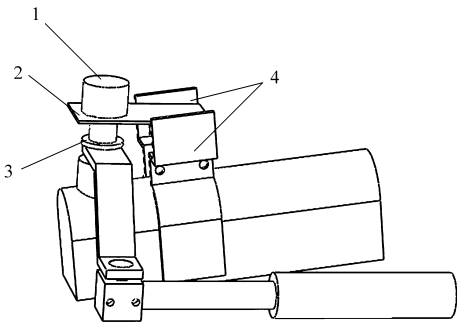


图 6 主销角度传感器固定形式示意图
Fig. 6 Angle sensor mount

1. 角度传感器 2. 支架 3. 联轴器 4. 夹板

2.2 试验过程

试验过程是将拖拉机右前轮慢慢从中间位置转到右极限,再从右极限转到左极限,最后回到中间位置。在车轮转动期间,采集并记录汽车转向角检测仪和 2 个角度传感器的数据,以便分析。

2.3 试验结果分析

把采集到的主销转角和拖拉机主销倾角参数(雷沃 M800 型拖拉机的主销内倾角 $\beta = 9^\circ$,主销后

倾角 $\gamma = 1^\circ$,综合倾角 $\phi = 78.65^\circ$,车轮最大转角 47°)代入到车轮-主销转角关系模型中来计算车轮转角,并与实测车轮转角进行比较,如图 7 所示。图中转角正号表示车轮向左旋转;负号表示车轮向右旋转。

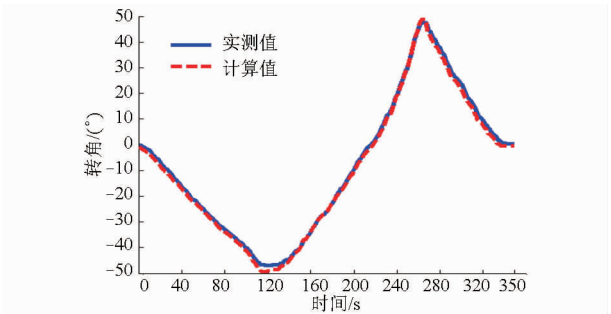


图 7 车轮-主销转角关系模型验证
Fig. 7 W-K model verification

图 7 反映出车轮转角模型计算值与实测值变化趋势是一致的,且拟合得较好,所以建立车轮-主销转角关系模型具有较好的合理性和准确性。

为了分析车轮-主销转角关系模型对车轮转角测量的补偿效果,表 1 中列举了主销转角、真实车轮转角和利用模型对主销转角补偿的角度部分数据。

表 1 主销转角、车轮转角和模型补偿

Tab. 1 Partial statistics of kingpin turning angle, wheel turning angle and angle corrected by model ($^\circ$)

序号	主销转角	车轮转角	模型补偿	补偿前	补偿后
1	5.22	5.34	5.36	0.12	0.02
2	10.63	11.20	10.88	0.57	0.32
3	14.80	15.42	15.13	0.62	0.29
4	20.43	21.20	20.87	0.77	0.33
5	25.31	26.15	25.83	0.84	0.32
6	30.49	31.28	31.08	0.79	0.20
7	35.77	36.68	36.41	0.91	0.27
8	40.16	41.14	40.82	0.98	0.32
9	45.08	46.36	45.75	1.28	0.61

表 2 为所有采集的转角数据通过模型修正前后车轮转角误差对比。

表 2 利用模型修正前后的误差对比

Tab. 2 Comparison of errors before and after correction

项目	平均误差/($^\circ$)	最大误差/($^\circ$)	相关系数
补偿前	0.83	1.64	0.945
补偿后	0.35	0.93	0.968

从表 1、表 2 中可以得出,通过车轮-主销转角关系模型对车轮转角进行补偿,使补偿后的车轮转角更逼近真实值,平均误差减小了 0.48° ,最大误差减小了 0.71° ,提高了车轮转角测量的精度。但是,补偿后的车轮转角还具有一定的误差。原因在于轮

胎变形、农机转向机构精度等因素也会对车轮转角的测量产生一定的影响。

3 模型应用

在雷沃 M800 型拖拉机上安装自主开发的分布式导航系统,并利用车轮-主销转角关系模型对车轮转角进行了补偿。其中测量车轮转角采用的是车轮转角检测器,具体结构如图 8 所示。



图 8 车轮转角检测器

Fig. 8 Detector for wheel turning angle

车轮转角检测器是一种连杆机构的传感器。车轮转角检测器主要由立杆、拉杆、摆杆和角度传感器等组成。拉杆分别铰接于立杆和摆杆,立杆固定在转向油缸的一端,而摆杆利用顶丝固定在角度传感器的旋转轴上。其测量原理是拟合主销上角度传感器和车轮转角检测器的数据对车轮转角进行测量的(拟合方程为 $K = 0.003A^2 + 0.89A + 0.43$, 其中 K 为主销转角, A 为车轮转角检测器输出角度)。

实际上这种车轮转角检测器属于直接测量的方法,即把主销转角当作车轮转角来测量。为消除主销倾角的影响,采用车轮-主销转角关系模型来补偿。车轮转角检测器通过车轮-主销转角关系模型补偿后,提高了车轮转角的测量精度,进一步提升了农机导航系统的性能。

4 结论

(1) 在不考虑轮胎变形、农机转向机构精度等因素的影响下,建立了一种车轮-主销转角关系模型,通过对模型仿真表明车轮转角与主销支架之间的误差不但随车轮转角的增大而增大,而且也随着主销内、后倾角的增大而增大。在车轮的极限位置时,这种误差达到最大。

(2) 车轮转角与主销转角之间的误差随着综合倾角的增大而减小。当综合倾角小于 80° 时,车轮与主销的角度误差较大,误差超过了 1° ;而当综合倾角大于 80° 时,车轮与主销的角度误差较小,最大误差不超过 1° 。

(3) 搭建了模型验证平台,试验表明主销转角通过模型补偿后与实测车轮转角之间的误差较小,验证了所建车轮-主销转角关系模型是合理的,并且能够补偿把主销转角当作车轮转角来测量的误差。

(4) 应用结果表明,车轮-主销转角关系模型在农机导航系统中补偿车轮转角测量误差时取得较好的效果,提高了车轮转角的测量精度。

参 考 文 献

- 1 Santana-Fernández J, Gómez-Gil J, Del-Pozo-San-Cirilo L. Design and implementation of a GPS guidance system for agricultural tractors using augmented reality technology[J]. Sensors, 2010, 10(11): 10435 – 10447.
- 2 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 – 198.
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 – 198. (in Chinese)
- 3 Li M, Kenji Imou, Katsuhiko Wakabayashi, et al. Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2009, 2(3): 1 – 16.
- 4 Yasuyuki H, Yusoke M, Tkashi Y. Agricultural vehicle navigation system: development of a guidance information display[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2009, 43(3): 187 – 192.
- 5 赵博,王猛,毛恩荣,等. 农业车辆视觉实际导航环境识别与分类[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 166 – 170.
Zhao Bo, Wang Meng, Mao Enrong, et al. Recognition and classification for vision navigation application environment of agricultural vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 166 – 170. (in Chinese)
- 6 Qiu Hongchu. Navigation control for autonomous tractor guidance[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.
- 7 冯雷. 基于 GPS 和传感技术的农用车自动导航系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- 8 Li Taochang, Hu Jingtao, Gao Lei, et al. Research on straight-line path tracking control methods in an agricultural vehicle navigation system[C]// Proceedings of the 11th International Conference on Precision Agriculture, 2012.
- 9 何卿,高焕文,李洪文,等. 基于 DSP 的拖拉机机电液转向控制系统[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 1 – 5.
He Qing, Gao Huanwen, Li Hongwen, et al. electrohydraulic steering control system of tractor based on DSP[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 1 – 5. (in Chinese)
- 10 吴晓鹏,赵祚喜,张智刚,等. 东方红拖拉机自动转向控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 1 – 5.
Wu Xiaopeng, Zhao Zuoxi, Zhang Zhigang, et al. Development of automatic steering control system[J]. Transactions of the

Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):1 – 5. (in Chinese)

11 李军,马蓉. 拖拉机自动转向系统设计研究[J]. 拖拉机与农用运输车,2012,39(5):47 – 50.
Li Jun, Ma Rong. Design and study of tractor automatic steering system[J]. Tractor & Farm Transporter, 2012, 39(5):47 – 50. (in Chinese)

12 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等. 东方红 X – 804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报,2009,25(11):139 – 144.
Luo Xiwen, Zhang Zhigang, Zhao Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X – 804 tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11):139 – 144. (in Chinese)

13 周建军,张漫,汪懋华,等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J]. 农业机械学报,2009,40(4):151 – 155.
Zhou Jianjun, Zhang Man, Wang Maohua, et al. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4):151 – 155. (in Chinese)

14 任文涛,迟德霞,刘金波,等. 遥控插秧机自动转向系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(1):175 – 179.
Ren Wentao, Chi Dexia, Liu Jinbo, et al. Design and test on remote rice transplanter automatic steering system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1):175 – 179. (in Chinese)

15 关文达,王超,王耀斌. 汽车构造[M]. 北京:清华大学出版社,2004:288 – 289.

16 郭孔辉,李宁,景立新. 基于转向试验的车辆主销定位参数完整解算[J]. 农业机械学报,2011,42(10):1 – 5.
Guo Konghui, Li Ning, Jing Lixin. Calculation of vehicle kingpin positional parameters based on steering test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):1 – 5. (in Chinese)

17 徐观,苏建,陈熔,等. 汽车主销后倾测量模型误差分析及标定方法[J]. 吉林大学学报:工学版,2008,38(1):17 – 20.
Xu Guan, Su Jian, Chen Rong, et al. Error analysis of measurement model and calibration method for automobile caster[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(1):17 – 20. (in Chinese)

18 宋清玉,李建,殷文齐. 基于多目标的机械压力机六连杆机构设计[J]. 农业机械学报,2012,43(4):225 – 229.
Song Qingyu, Li Jian, Yin Wenqi. Mechanical press six-link mechanism design based on multi-objective[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4):225 – 229. (in Chinese)

Compensation Model for Measurement Error of Wheel Turning Angle in Agricultural Vehicle Guidance

Wang He^{1,2} Hu Jingtao^{1,2} Gao Lei^{1,2}

(1. *Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China*

2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

Abstract: A measurement error was caused by using the kingpin turning angle in place of the wheel turning angle in agricultural vehicle guidance. A relation model between the wheel turning angle and the kingpin turning angle was established to compensate the measurement error. Then, a simulation was carried out, showing that the error between the wheel turning angle and the kingpin turning angle increased with the increase of the kingpin inclination. Next, a test was conducted to verify the correctness of the model, and the results showed that the model improved the accuracy of measurement for the wheel turning angle. The mean error decreased by 0.48°, and the maximum error decreased by 0.71° after model compensation. Finally, in practical application, the proposed model improved the performance of agricultural vehicle guidance system.

Key words: Agricultural machinery Automatic navigation Wheel turning angle Error compensation