

路面行驶工况下拖拉机驱动轮滑转率的测试与分析

钟文军 高 强 鲁植雄 梅士坤 刁秀永 姜春霞

南京农业大学工学院,南京 210031

摘要 为测试拖拉机经常行驶的水泥路面、石子路面、软土路面工况驱动轮滑转率的变化情况,采用 GPS 法、雷达法、最小轮速法 3 种方法对拖拉机的行驶速度进行测试,驱动轮的轮速采用编码器进行测量;利用 PCI1740 数据采集卡采集各传感器信号,采用图形化编程软件 Labview 编程来实现数据的实时显示和存储,测试不同车速、不同路面行驶工况下拖拉机驱动轮滑转率。结果表明:软土路面上的打滑程度最大,水泥路面上打滑程度最低;在低速(一档、二档)时,拖拉机的滑转率为 9.0%~13.6%;在高速(三档、四档)时,拖拉机的滑转率为 3.26%~6.27%。GPS 法测试时不受路面情况的影响,雷达法适合路面情况较好的环境,最小轮速法适合车速较高的时候;拖拉机的滑转率随着车速的增加呈减小的趋势。

关键词 拖拉机; 驱动轮; 滑转率; 路面

中图分类号 S 219 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2015)03-0130-07

农用拖拉机的路面行驶工况有较大的不确定性,有平坦的水泥路和沥青路,而更多则是复杂多变的石子路面或软土路面。合理控制拖拉机滑转率则可改善拖拉机牵引效率和优化燃油效率,能降低油耗 20%~30%,可显著提高拖拉机燃油经济性^[1-3]。随着农业现代化、绿色化的发展,对拖拉机的油耗提出了更高的要求。拖拉机在不同路面的滑转特性不同,而且滑转特性跟燃油消耗密切相关^[4]。拖拉机传动效率(占发动机输出功率 75%~81%)和发动机效率(占发动机输出功率 30%~35%)几乎很难提高,而牵引效率是唯一可以提高的^[1]。农用拖拉机在不同作业类型、不同作业地块下滑转率是不同的^[5]。拖拉机只有工作在最佳滑转率下才能充分发挥驱动能力,保证较高的牵引效率和工作效率。为了使驾驶人员能够及时获得滑转率信息,以保证农用拖拉机工作在最佳滑转率附近,必须对拖拉机滑转率进行实时测量。

测量滑转率有两个要素:一个是行驶速度(即机身速度)的测量,另一个是驱动轮轮速的测量。滑转率测量精度的高低,取决于行驶速度和轮速的测量精度。根据国标规定,滑转率是根据拖拉机行走 50 m 车轮转数来计算^[6],但只能计算出拖拉机的平

均滑转,无法精确测量实时滑转率。行驶速度的测量方法有多种^[7-8]。标杆法是根据拖拉机通过固定标杆的时间和距离来计算,测量的是拖拉机的平均速度^[9],只能测量平均滑转率。低速雷达法是利用多普勒原理来测速,此方法应用比较普遍,测量精度也较高^[10]。非驱动轮轮速法是由于和驱动轮打滑相比打滑程度较低,非驱动轮中最小轮速则可近似替代行驶速度。GPS 法是近些年才发展出来的高精度测速方法,GPS 除了具有高精度定位测量以外,也可以用来测量移动物体的实时速度。GPS 测量速度的方法有位置差分测速、多普勒频移测速、载波相位中心差分法测速^[11-13]。拖拉机轮速测量主要是通过轮速传感器来测量,一般选用霍尔式、光电式传感器或者是编码器。拖拉机上没有轮速传感器,所以需要外加安装轮速传感器。编码器的安装相对来说比较简单容易,相关文献表明编码器的测量精度较高^[14]。

拖拉机驱动轮滑转率是牵引力、作业深度等控制的主要参量,其测量精度和实时性对控制质量具有重大影响。笔者利用多普勒雷达、GPS 实时动态测量(RTK)、高精度的编码器、非驱动轮最小轮速法等不同的测速方法进行对比试验,寻找适合拖拉

机路面行驶工况下瞬时滑转率的测试方案,即寻找一种拖拉机驱动轮滑转率的实时、精准测试的最佳方法,旨在为后续不同工况下滑转率门限、控制策略等研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 拖拉机选择

选用沃得 854 拖拉机,试验时可切断或接通分动器,以实现两轮驱动和四轮驱动。

1.2 路面选择

在江苏省农业机械鉴定站拖拉机试验场,选择几种拖拉机经常行走的水泥路面、软土路面、石子路面进行滑转率测试。水泥路面是用混凝土制备,采用普通硅酸盐水泥、中砂或粗砂和Ⅰ、Ⅱ级碎(砾)石搅拌浇注,承载能力好,路面光滑;软土路面是普通泥土铺筑的路面,路面较粗糙,压实度约为 88%~96%,承载能力较差;石子路面是用玄武岩、花岗岩打碎的小石子铺筑的,压实度较高,表面颗粒明显,承载能力较好。不同的路面情况会产生不同的路面附着系数,会有不同的打滑特性。

1.3 测试原理与方法

1)轮速测量方法。轮速的测量采用日本 OMRON 公司生产的 E6B2-CWZ6C 增量式光电编码器。该编码器有 A、B、Z 三相,A 相和 B 相输出的相位差为 90°。编码器每转 1 周会产生 1 000 个脉冲,脉冲输入到数据采集卡中就可以测量出转速。

为了消除拖拉机振动引起编码器 A 相和 B 相正反转波动,引起测试误差,在编码器安装和采集电路采取了相关措施。在编码器安装时,一方面将编码器内圈(动圈)与驱动轮驱动轴进行刚性连接,以保证为一个整体,而不是采用磁性支座安装;另一方面在编码器的外圈(静圈)采用 3 个支点与拖拉机机架固定在一起,以保证编码器外圈不晃动。在编码器采集电路上增加了鉴相电路,采用一个 D 触发器和两个与非门,以减少振动带来的误差。

编码器是安装在 4 个车轮上,利用 PCI1780 计数采集卡采集车轮旋转的脉冲个数,从而计算出车轮的转速 $n_L = N/1000 (r/s)$,采集频率是 1Hz。由于本试验拖拉机前、后轮直径不同,前、后轮轮速计算公式为

$$V_L = 3.6 \times n_L \times \pi \times d$$

式中 d 为车轮直径。

2)行驶速度测试方法。选用 3 种不同的速度测

试方法对拖拉机进行车速测量。

①GPS 法。选用日本 TOPCON 公司生产的双频 GNSS 接收机,通过双星(GPS+GLONASS)差分定位能有效提高定位精度,通过 2 台 HIPER IIG 接收机进行实时动态测量(RTK)。基准站采集载波相位差分观测值,生成 RTK 改正数,并将改正数发送到流动站;流动站处理自己采集到的载波相位差分观测值和接收到的改正数,高精度地计算出其相对位置。RTK 的平面精度高达 10 mm,其高程精度高达 15 mm,测速精度为 2 mm/s。HIPER IIG 接收机输出的是 NEMA 标准格式中 VTG 语句,VTG 语句中包含真航向角度、地面水平速度、定位方式等。VTG 语句通过 R232 串口是以 1Hz 频率输出一串 49 个字符的字符串,速度信息在字符串第 37 到 43 位。利用 Labview 中截取字符串 VI 将车速信息截取出来,并利用字符转十进制 VI 转换为十进制数值,记为 V_{GPS} ,则拖拉机滑转率 S 为

$$S = 1 - V_{GPS}/V_L$$

式中 V_L 为拖拉机的轮速, V_{GPS} 为用 GPS 测得的拖拉机行驶速度。

②低速雷达法。选用美国帝强公司生产的一款多普勒雷达速度传感器。该雷达安装在拖拉机侧边的专用安装铁架上,相对于地面平面夹角(发射角) α 为 31.23°(要求安装角为 35°±5°),离地面的高度为 610 mm,且前方无障碍物。输出频率 f_0 为 34.8 Hz,测速范围是为 0.53~96.6 km/h,通过现场标定的测速误差在 1%~3%。其行驶速度 V_R 为^[15]

$$V_R = \frac{1}{2} \frac{c}{\cos \alpha} \frac{f_r}{f_0}$$

式中 c 为雷达波的波速, f_r 为雷达波的频率差, f_0 为雷达波的频率, α 为雷达波的发射角。利用雷达测量出的驱动轮滑转率为

$$S = 1 - \frac{V_R}{V_L}$$

③非驱动轮速近似替代法。在驱动工况时,可以利用最小轮速法来表达车速。对于两轮驱动拖拉机,最小轮速(V_{Lmin})一般发生在非驱动轮上。利用安装在 4 个车轮上编码器测量出来的转速,计算出最小的轮速来表达拖拉机的行驶速度,则驱动轮的滑转率为

$$S = 1 - \frac{V_{Lmin}}{V_L}$$

式中 S 为拖拉机滑转率。

1.4 测试方案与设计

为分析拖拉机行驶的速度、行驶的路面类型对滑转率的影响,采用多因子、多水平正交试验进行滑转率测试(表 1)。每个水平与每个因子(A,B,C)相互测试,共试验 12 次。

试验中首先是确定 3 种试验路面,然后利用不同的档位来模拟不同车速在这 3 种路面进行测试。试验中路段测试距离为 50 m,驾驶员在每次测试中尽量将发动机转速稳定在 1 000 r/min,以保证拖拉机在每个档位的车速是基本稳定的。

表 1 路面行驶工况下拖拉机驱动轮滑转率
测试的正交试验

Table 1 Orthogonal experiment factors of tractor slip test on roads

水平 Level	车速范围(A) Speed range	路面类型(B) Road surface type	拖拉机功率(C) Tractor power
1	一档(0~5 km/h) First gear	水泥路面 Cement	62.5 kW
2	二档(5~10 km/h) Second gear	石子路面 Gravel road	—
3	三档(10~15 km/h) Third gear	软土路面 Dirt road	—
4	四档(15~20 km/h) Fourth gear	—	—

1.5 传感器的安装

试验中需要安装的传感器有两台 GPS、1 个多普勒雷达、4 个编码器。

将一台 HIPER IIG 接收机放置三脚架上面(三脚架调平),将另一台 HIPER IIG 接收机设置为差分移动站安装在拖拉机的正上方。按照要求将多普勒测速雷达安装在 WD854 拖拉机离地高度 610 mm 的范围内,与水平面成 31.23° 的夹角。4 个编码器分别安装在 4 个车轮上,并采取措施减少拖拉机振动对编码器输出信号的影响。

1.6 测试系统

GPS 利用 RTK 测量,基准站观测值和基准站坐标被转换成 RTCM 标准格式,通过通讯数据链,无线传输给流动基准站接收机。利用操作手簿设置好流动站的输出参数,通过 R232 串口线连接到笔记本电脑上。

测速雷达和编码器的信号输入到 PCI1780 数据采集卡中,如图 1 所示。

利用图形化编程软件 Labview 同步读取 PCI1780 数据和 GPS 串口数据,然后进行数据处理

运算、显示以及存储^[16],如图 2 所示。

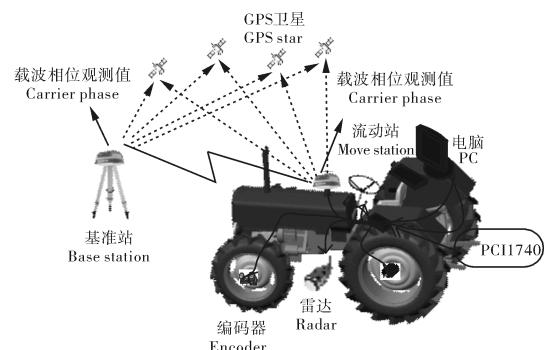


图 1 拖拉机滑转率测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of tractor slip test

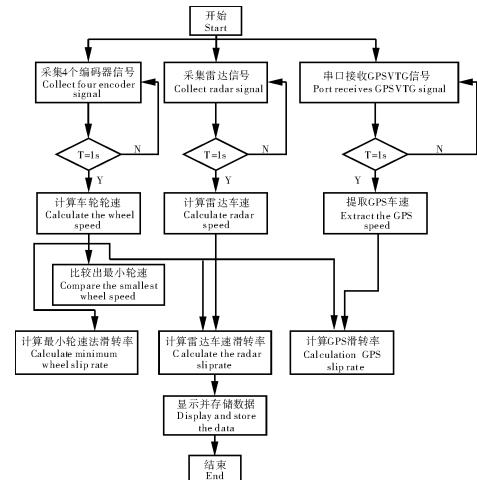


图 2 Labview 采集计算流程图

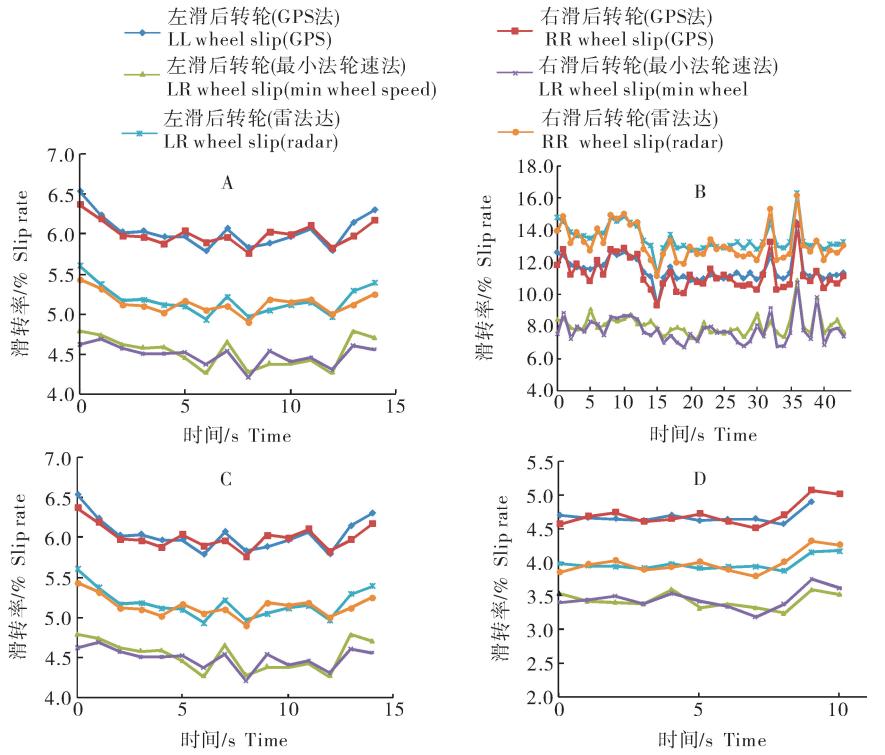
Fig.2 Collecting calculation flow chart of Labview

2 结果与分析

2.1 水泥路面拖拉机驱动轮的滑转率

水泥路面不同档位行驶工况下拖拉机驱动轮滑转率的测试结果如图 3 所示。测试中用了 3 种方法计算滑转率,拖拉机利用一档,发动机在 1 000 r/min 进行测试时,拖拉机的速度在 5 km/h 左右。从图 3-A 中可以看出,利用 GPS 测试法、最小轮速法和雷达测速法 3 种方法的测试结果显示拖拉机的平均滑转率分别为 11.37%、7.93%、13.32%。利用最小轮速法计算滑转率时值最小,相对误差较大,而雷达法和 GPS 法的测量结果比较接近,较为合理。从图 3-B 可看出,拖拉机在行走的过程中左、右驱动轮的滑转率跟随性比较好,说明左、右驱动轮的打滑情况基本一致。从图 3-B 中可以看出二档车速时的驱动轮的滑转情况,利用 3 种方法测量出的平均滑转率为 9.00%、6.70%、7.68%。同样,可以看出

是左、右驱动轮的滑转情况基本相同。3种测量方法GPS法测量出的滑转率最大,雷达法其次,最小轮速法最小。从图3-C中可以得到三档车速时3种测量方法的平均滑转率为6.07%、4.47%、5.40%。



A.一档行驶 With 1st gear; B.二档行驶 With 2nd gear; C.三档行驶 With 3rd gear; D.四档行驶 With 4th gear.

图3 水泥路面不同档位行驶工况下拖拉机驱动轮滑转率

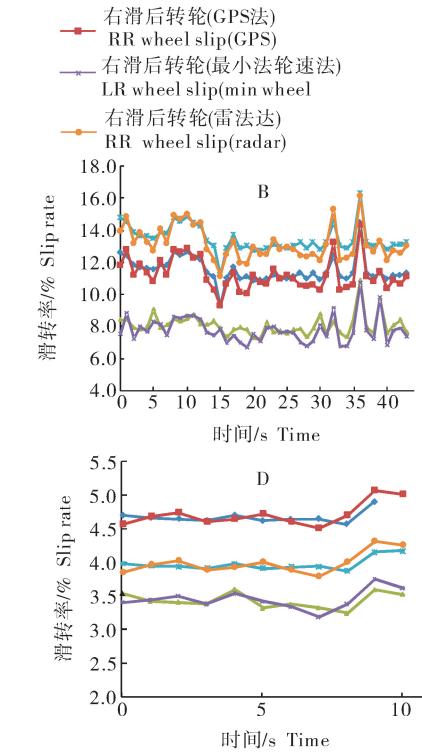
Fig.3 Tractor slip rate driven on cement roads with different gear

2.2 石子路面拖拉机驱动轮的滑转率

石子路面不同档位行驶工况下拖拉机驱动轮滑转率的测试结果如图4所示。拖拉机利用一档,发动机在1 000 r/min进行测试时,拖拉机的速度为8~9 km/h。从图4-A中可以看出,同样的3种方法在一档车速测试结果显示拖拉机的平均滑转率分别为13.70%、6.14%、13.90%。利用最小轮速法计算滑转率时值最小,在石子路面上非驱动的滑转程度是不可忽视的,相对误差很大,这种计算方法则是不可信的。雷达法和GPS法的测量结果比较接近,也较为合理。

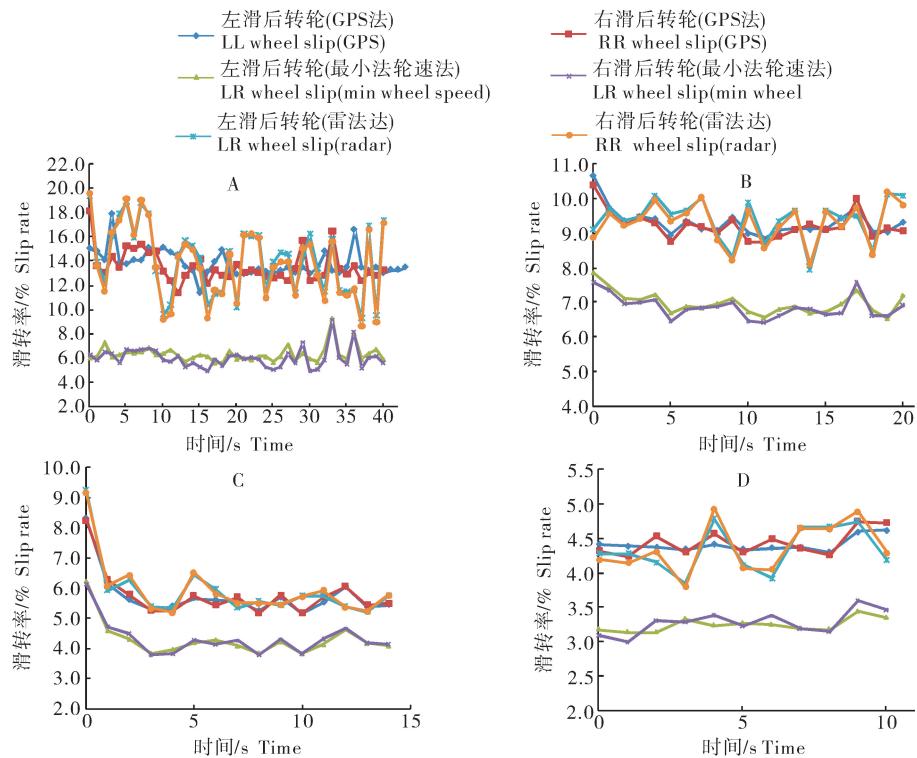
从图4-A可知,拖拉机在行走的过程中左、右驱动轮的滑转率跟随性比较好,说明左、右驱动轮的打滑情况基本一致。从图中可以明显看出雷达测速计算滑转率的瞬时滑转率波动很大,稳定性较差。

从图3-D中四档车速时3种测量方法的平均滑转率为4.68%、3.49%、4.05%。图3中的曲线有突起,是驾驶员的原因,驾驶时很难保证拖拉机的行进速度的稳定。



从图4-B中可以看出二档车速时的驱动轮的滑转情况,利用3种方法测量出的平均滑转率为9.53%、7.14%、9.21%。同样,还可以看出左、右驱动轮的滑转情况基本相同。

3种测量方法GPS法测量出的滑转率最大,雷达法其次,最小轮速法最小。从图4-C中可以得到三档车速时3种测量方法的平均滑转率为5.56%、4.18%、5.53%。从图4-D中四档车速时3种测量方法的平均滑转率为4.41%、3.26%、4.02%。测量结果表明:在石子路面由于路面的不平度较大,比起水泥路面雷达测量出的速度波动较大(雷达波与前进方向角度略微的变化引起),不宜用来计算测量的拖拉机的瞬时滑转率;相反GPS测速法则比较平稳,最小轮速法则由于非驱动轮的存在较大的滑转测量,其结果也是不可信的。



A.一档行驶 With 1st gear; B.二档行驶 With 2nd gear; C.三档行驶 With 3rd gear; D.四档行驶 With 4th gear.

图4 石子路面不同档位行驶工况下拖拉机驱动轮滑转率

Fig.4 Tractor slip rate rate driven on gravel roads with different gear

2.3 软土路面拖拉机驱动轮的滑转率

软土路面不同档位行驶工况下拖拉机驱动轮滑转率的测试结果如图5所示。拖拉机利用一档，拖拉机的速度在13~14 km。

从图5-A中可以看出，同样的3种方法在一档车速测试结果显示，拖拉机的平均滑转率分别为13.6%、6.04%、13.04%。雷达法和GPS法的测量结果比较接近，较为合理。从图5-A可以明显看出雷达测速法测量出滑转率的瞬时滑转率的波动很大，稳定性较差。从图5-B中可以看出二档车速时的驱动

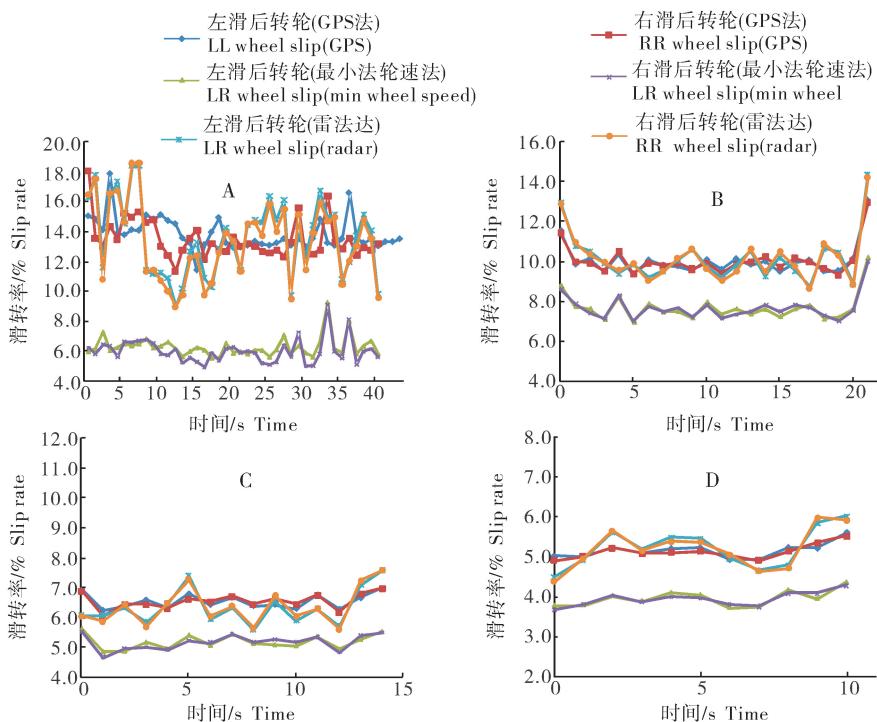
轮的滑转情况，利用3种方法测量出的平均滑转率为10.2%、7.36%、9.67%。由图5-C可知，三档车速时3种测量方法的平均滑转率为6.64%、5.01%、6.37%。由图5-D可知，四档车速时3种测量方法的平均滑转率为5.38%、4.2%、5.36%。

测量结果表明：雷达法测量出的速度波动比GPS法测量的车速大，相反GPS法测速法则比较的平稳；最小轮速法在低速时测量结果不太可信，可当车速增加到一定时与其他2种方法测量结果比较接近。

表3 拖拉机在不同档位和不同路面行驶的平均滑转率

Table 3 Average slip rate of different gear on different roads

挡位 Gear	水泥路面 Cement			石子路面 Gravel road			软土路面 Dirt road		
	GPS	最小轮速 Min wheel speed	雷达 Radar	GPS	最小轮速 Min wheel speed	雷达 Radar	GPS	最小轮速 Min wheel speed	雷达 Radar
一档 First gear	11.37	7.93	13.32	13.7	6.14	13.9	13.60	6.04	13.04
二档 Second gear	9.00	6.70	7.68	9.53	7.14	9.21	10.20	7.36	9.67
三档 Third gear	6.07	4.47	5.40	5.56	4.18	5.53	6.64	5.01	6.37
四档 Fourth gear	4.68	3.49	4.05	4.41	3.26	4.02	5.38	4.20	5.36



A.一档行驶 With 1st gear; B.二档行驶 With 2nd gear; C.三档行驶 With 3rd gear; D.四档行驶 With 4th gear.

图5 软土路面不同档位行驶工况下拖拉机驱动轮滑转率

Fig.5 Tractor slip rate driven on soft soil roads with different gear

3 结论与讨论

拖拉机在水泥路面上行驶时,最小轮速法、多普勒雷达法和GPS法3种测试方法的测试结果都比较稳定,变化系数小。GPS法和雷达测速法测试的结果比较接近,最小轮速法测试结果变小是因为非驱动轮也存在一定的滑转。从表3中可以看出,在低速时(一档、二档),滑转率在7.68%~13.32%之间变化。低速时拖拉机的驱动力过剩,使得拖拉机的打滑程度增加。在高速时(三档、四档),滑转率在4.05%~6.07%之间变化。

拖拉机在石子路面和软土路面上的打滑程度比在水泥路面上行驶要大。主要是因为车轮在石子路面上轮胎的接地面较少,易打滑。这2种路面的路面不平度较大,利用雷达测速时有较大的波动,测量瞬时滑转率会出现较大的波动。GPS法不受路面条件的干扰,测试结果比较平稳。在低附着路面上,非驱动轮的打滑相对严重,所以不适合用最小轮速法来测量滑转率。

在3种路面行驶,随着车速的增加,拖拉机的打滑程度是逐渐减小的。由于拖拉机在低速时打滑程度较为严重,高速时滑转率会控制在4.68%~5.38%的范围内。在路面比较平坦的水泥路面GPS法和雷达法都可以较好地测量拖拉机的打滑程度,然而在路面比较差时GPS法的稳定性优势体现了出来。但是GPS信号易受树木、建筑等干扰。对于雷达法来测试拖拉机的瞬时滑转率,由于受路面条件的限制,会影响测试精度。为提高测试精度在测试和控制系统中加装车身姿态传感器或采用Janus原理的雷达来实时监测,可消除拖拉机俯仰的影响,以提高雷达测试精度,相比GPS法来说更具有经济价值。最小轮速法在低速时测量滑转率是不可信的,但在车速较高时也能准确测量车辆的打滑情况。

滑转率的测试主要是为研究拖拉机牵引力、作业深度等提供科学依据,其测量精度和实时性对控制质量具有重大影响,因此,精准、实时测得驱动轮的滑转率具有理论意义和应用价值。

参 考 文 献

- [1] RAHEMAN H, JHA S K. Wheel slip measurement in 2WD tractor [J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44: 89-94.
- [2] PRANAV P K, PANDEY K P, TEWARIB V K. Digital wheel slippmeter for agricultural 2WD tractors [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 73: 188-193.
- [3] EBROWSKI Z J. Traction efficiency of a wheeled tractor in construction operations [J]. Autom Constr, 2010, 19: 100-108.
- [4] 周慧, 鲁植雄, 白学峰, 等. 四轮驱动拖拉机滑转率的测量与特性分析 [J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2013, 44(3): 423-427.
- [5] 印祥, 卢博友, 钟以崇, 等. 拖拉机滑转率实时测量中的车速测量方法 [J]. 农机化研究, 2009(4): 237-240.
- [6] 郑太雄, 单荣明, 蒋国英, 等. 汽车 ABS 参考车速的确定方法 [J]. 汽车技术, 2010(3): 37-40.
- [7] 孟志军, 刘卉, 付卫强, 等. 农田作业机械测速方法试验 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 141-145.
- [8] 何燕玲. 雷达测速算法研究与软件实现 [D]. 武汉: 华中科技大学图书馆, 2012.
- [9] PRANAV P K, TEWARI V K, PANDEY K P, et al. Automatic wheel slip control system in field operations for 2WD tractors [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 84: 1-6.
- [10] 何海波, 杨元喜, 孙中苗. 几种 GPS 测速方法的比较分析 [J]. 测绘学报, 2002(3): 217-221.
- [11] 吴富梅, 肖云. 利用伪距差分法进行 GPS 测速 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010(9): 1034-1038.
- [12] 王仁广, 刘昭度, 齐志权, 等. 汽车 ABS 参考速度的确定方法 [J]. 农机化研究, 2006(3): 198-200.
- [13] 何海波. 高精度 GPS 动态测量及质量控制 [D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学图书馆, 2002.
- [14] 文晓燕, 郑琼林, 韦克康, 等. 增量式编码器测速的典型问题分析及应对策略 [J]. 电工技术学报, 2012(2): 185-189, 209.
- [15] 张力. 基于 Labview 的旋转编码器转角及转速测量仪的设计 [J]. 三峡大学学报, 2008(3): 67-69.
- [16] 田光兆, 安秋, 姬长英, 等. 低速智能农业车辆多分辨率自适应测速系统设计 [J]. 农业机械学报, 2013(2): 159-164.

Test and analysis of the slip rate of tractors driven on roads

ZHONG Wen-jun GAO Qiang LU Zhi-xiong MEI Shi-kun DIAO Xiu-yong JIANG Chun-xia
College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

Abstract The purpose of the experiment is to find out the variation of the slip rates of tractors on different types of roads on which they often run, such as cement road, gravel road, dirt road. The running speed of the tractor was measured by GPS, Doppler radar and the minimum wheel speed method, and the speed of the driving wheel of the tractor was measured by the encoders. PCI1740 data acquisition card was used to collect sensors data, and then the graphical programming software Labview was used to display and store real-time data. The experiment was carried out on different roads with different running speeds of the tractor. The test results showed that the minimum degree of slippage occurred on the cement road while the largest slippery occurred on dirt road. When the tractor was running at a low speed (first gear, second gear), the tractor's slip rate was 9.0%-13.6%. When the tractor was running at a high speed (third gear, fourth gear), the slip rate was 3.26%-6.27%. The GPS test results were not affected by the road conditions, and the radar method was suitable for the good road conditions, and the minimum wheel speed method was suitable when the tractor was running at a high speed. The tractor's slip degree decreased with the increase of the speed of the tractor.

Key words tractor; driving wheel; slip rate; road

(责任编辑:陈红叶)