

# Based on GNSS and MIMU Fusion of Measurement and Calculation Method of Driving Wheel Slip of Vehicles

Bingrui Zhang

School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin  
Email: zhangbingrui415@163.com

Received: Nov. 25<sup>th</sup>, 2018; accepted: Dec. 10<sup>th</sup>, 2018; published: Dec. 17<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Accurate measurement of slip is one of the key issues to be better dealt with in industries, including agriculture, forestry and transportation. Especially for power-output wheeled vehicles, the wheel slip can make great impact on their tractive efficiency, fuel consumption and the like. Besides, in the complicated working environment, the measurement signal can also be interfered by the noise, causing the difficulty to accurate measurement of the slip of the wheel. Therefore, this thesis proposes a method for measuring and calculating the driving wheel slip of the power-output wheeled vehicle. The actual forward speed and the theoretical forward speed of different driving wheels are measured and calculated through the algorithm of multi-sensor data fusion and resolving and calculating based on Kalman filter with the dynamic signals measured by the (GNSS) Global Navigation Satellite System, (MIMU) Micro-Inertial Measurement Unit and Hall sensor, thereby calculating the slip of each driving wheel. The actual test shows that under the same road condition, the faster the speed, the smaller the fluctuation of the slip rate. Under the condition of stable speed, the slip rate of asphalt road vehicles fluctuated less, and the slip rate of gravel road and grassland fluctuated greatly. This thesis can serve as theoretical support for the precise control of vehicles with vital academic significance and application prospects.

## Keywords

Wheel Slip, GNSS, MIMU, Kalman Filter

---

# 基于GNSS与MIMU融合的车辆驱动轮滑转率测算技术

张炳瑞

天津工业大学, 天津

Email: zhangbingrui415@163.com

收稿日期: 2018年11月25日; 录用日期: 2018年12月10日; 发布日期: 2018年12月17日

## 摘要

滑转率的准确测量是农业、林业、交通运输设备制造业等行业领域亟待解决的关键问题之一, 尤其是对于输出动力型工程车而言, 其工作环境复杂, 车轮滑转率会对其牵引效率、油耗等造成很大的影响。其次车辆在实际工作环境中测量信号还容易受到噪声干扰, 无法准确计算出车轮的滑转率。故本文提出一种针对输出动力型工程车车轮滑转率的测算方法: 通过GNSS (全球导航卫星系统)、微惯导测量单元(MUMI)测得的信号, 结合霍尔传感器测得驱动轮的理论前进速度与车体实际前进速度, 进行卡尔曼滤波后计算出驱动轮的滑转率。实验结果表明: 同一路面状况下, 速度越快, 滑转率波动越小。速度稳定情况下, 柏油路车滑转率波动较小, 砂石路、草地滑转率波动较大。本文为车辆实现精确控制提供了理论支撑, 具有重要的学术意义和应用前景。

## 关键词

滑转率, GNSS, MIMU, 卡尔曼滤波

Copyright © 2019 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

起初对于滑转率的研究大多集中在农业领域, 农业拖拉机的有效操作包括: 1) 为指定拖拉机选择一个最佳工作速度。2) 牵引效率的最大化。3) 发动机和传动系燃料效率的最大化。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, 当车轮滑转率保持在 8%~15%时牵引效率达到最大, 若过低或高于此范围, 牵引效率将大大减小[1]。此外, 过高的滑转率会导致大量的能量浪费在轮胎与土壤作用之间, 使轮胎的寿命减少, 也可能不利于农作物的生长[2]。故将滑转率作为拖拉机性能预测的一个重要参数, 它也是衡量拖拉机有效工作的主要指标之一[3]。

工程车辆中重型运输车、越野工程车、拖车等在复杂的工作环境工作时, 车轮滑转率的增加不仅会加大油耗, 还会提高在沥青路面留下辙的概率从而破坏道路, 故滑转率的准确测量同样是该领域中亟待解决的关键问题之一[4]。

由于车轮滑转率计算公式简单, 涉及到的计算量仅有车轮理论前进速度及车体实际前进速度, 故如何准确测得这两种速度成为测量滑转率的关键。但目前应用在拖拉机或工程车辆中计算滑转率的方法测量精度较低, 车轮滑转率的计算会存在误差, 故本文提出一种较为准确的驱动轮滑转率的测算方法。

随着旋转编码器、霍尔式与光电式传感器的广泛应用, 轮转速的精确测量变得较为容易, 而车体实际前进速度的精确测量成为测量车轮滑转率的一大难题[5]。目前测量车轮行驶速度的方法主要有五轮仪测速法、最小轮速法、多普勒雷达法及 GPS 法[6]。其中, 五轮仪测速法、最小轮速法较早被提出, 此类方法利用测得的从动轮的转速近似代替驱动轮实际前进速度, 适用情况较少, 测量误差较大, 尤其在低速行驶时可信度很低[7]。基于多普勒频移原理的雷达地面速度传感器被应用于众多领域中的速度测量中,

但车辆行驶在非平坦路段时其测试精度较低，可靠性较差[8]。随着 GPS (全球定位系统)的迅速发展，由于不受路面状况的影响，基于 RTK (实时动态测量)原理的差分 GPS 技术在车辆定位及实时测速上表现出了很高的精确度[9]。

由于工程车辆工作环境复杂，测量信号都会遭到一定程度的噪声干扰。传统的 RTK-DGPS 测量信号容易受树木、建筑等干扰，对天气状况也有一定的要求。因此单一传感器的直接使用并不能满足工程车辆车轮滑转率实际复杂情况的测量需求，所以需要多个基于不同原理的传感器得到的测量值进行滤波及数据融合，互相补偿，使得测量值更加精确[10]。卡尔曼滤波算法常用于估算系统状态变量及抑制测量噪声，已经不仅成功应用于航空航天、雷达目标跟踪、控制系统等工程领域，还可用于时序分析。所以本课题使用卡尔曼滤波算法[11]。

## 2. 滑转率测算方法

### 2.1. 系统设计

如图 1 所示，本课题选用 GNSS (全球导航卫星系统)计算差分速度，联合 MIMU (微惯导系统)中的加速度计和陀螺仪共同测量车体实际前进速度，选用霍尔传感器测量轮转速。各个传感器测量信号通过卡尔曼滤波及数据融合算法计算得到驱动轮滑转率的动态测量值。其中基站检测单元与机载检测单元之间通过 UHF (高频无线电波)传输数据，滑转率计算公式为(1)，其中  $w$  为轮转速； $R$  为驱动轮的半径； $v$  为车体实际前进速度； $s$  为滑转率， $wR$  表示驱动轮理论前进速度。

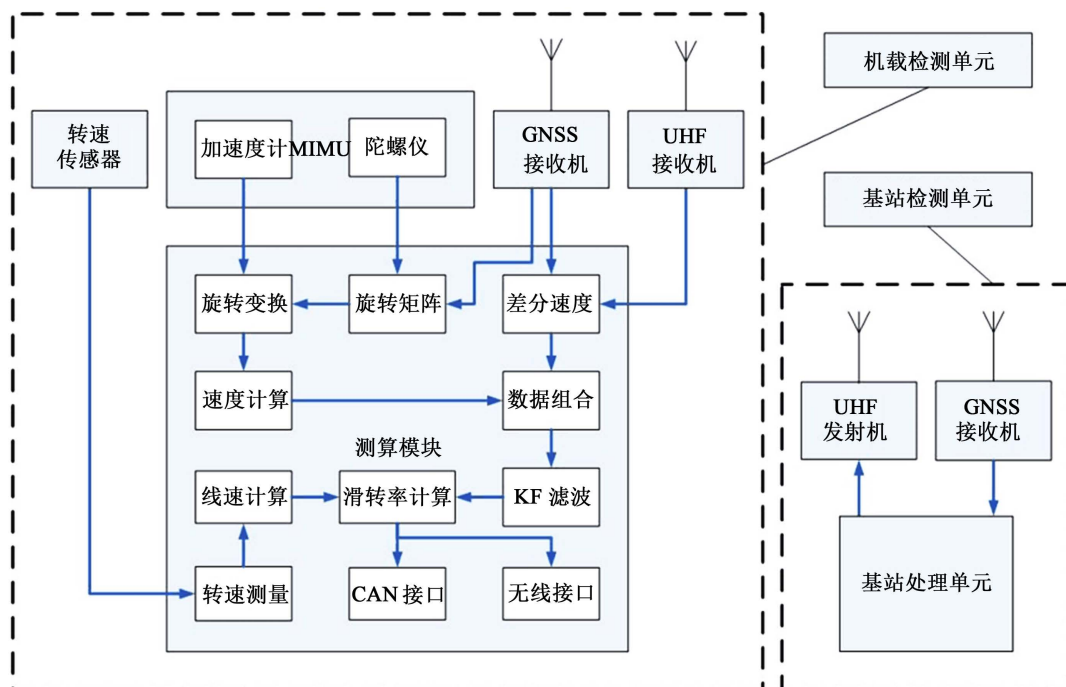


Figure 1. System design

图 1. 系统设计

$$s = \frac{wR - v}{\max(wR, v)} \times 100\% \quad (1)$$

基站检测单元见实物图 2 左，机载检测单元见实物图 2 右。图 2 中车辆为实测试验载体。



Figure 2. Equipment  
图 2. 设备

转速传感器如图 3 所示，使用霍尔传感器。



Figure 3. Speed sensor  
图 3. 转速传感器

## 2.2. 算法设计

在实际测量中，需将 GNSS 测量值、MIMU 测量值与车轮转速测量值解算并消除噪声和突跳干扰。针对本课题的测量系统结构，本文应用卡尔曼滤波器，依据车轮间存在的空间结构和姿态变化。通过使用卡尔曼滤波式(2)~(6)分别得出轮转速与车体实际前进速度，进而计算出滑转率。

$$\hat{X}(k|k-1) = A \times \hat{X}(k-1|k-1) \quad (2)$$

$$P(k|k-1) = A \times P(k-1|k-1) \times A^T + Q \quad (3)$$

$$Kg(k) = P(k|k-1) \times H^T \times [H \times P(k|k-1) \times H^T + R(k+1)]^{-1} \quad (4)$$

$$P(k|k) = [I - Kg(k) \times H] \times P(k|k-1) \quad (5)$$

$$\hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + Kg(k) \times [Z(k) - H \times \hat{X}(k|k-1)] \quad (6)$$

故卡尔曼滤波状态模型为：

$$\begin{cases} X(k+1) = A \times X(k) + W(k) \\ Z(k) = H \times X(k) + V(k) \end{cases} \quad (7)$$

式中  $X(k)$  为  $k$  时刻系统向量， $Z(k)$  为  $k$  时刻观测器的系统测量值， $A$  为系统状态矩阵， $H$  为观测矩阵， $dt$  为采样周期。 $W(k)$  过程噪声， $V(k)$  为测量噪声，噪声方差分别为  $Q$ 、 $R$ 。

$$X(k) = [v(k) \ a(k) \ w(k) \ a_w(k)]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & dt & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & dt \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

通过算法计算出车体前进速度  $v$ 、轮转速  $w$ ， $dt$  为测量周期 0.1，由公式(1)计算出滑转率。

### 3. 实测实验

测试车辆在不同速度、不同路况下滑转率的变化情况，设计如下实测试验。

#### 3.1. 柏油路面下不同速度的测试情况

车辆在较为平坦的柏油路面进行实测实验，分别控制车速在 5 km/h、7 km/h、10 km/h、20 km/h 时采集数据，速度稳定情况下整理得出图 4。

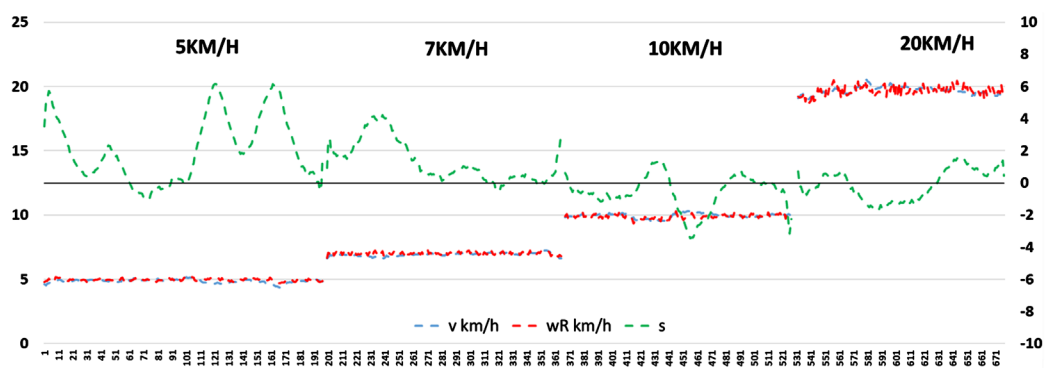


Figure 4. Different speeds

图 4. 不同速度

分析图 4 可得在四段速度中，速度越高，滑转率波动最小，车速在 20 km/h 左右时，滑转率在 2% 之内波动。速度越低，滑转率波动越大，速度在 5 km/h 左右时，滑转率在 6% 之内波动。

#### 3.2. 不同路况的测试情况

车辆分别在柏油路、砂石路与草地进行测试，测试路面情况如图 5 所示，图中从左到右分别为柏油路面、砂石路面、草坪路面。



Figure 5. Road condition

图 5. 路况

三种路面状况得出的滑转率变化曲线如图 6 所示。加速段较大的正滑转率提供了加速作用力，减速段较大的负滑转率提供了减速阻力，而匀速段基本为正的滑转率维持了车辆前行速度，这说明实测结果动态准确地反映了车辆的运动变化规律。车辆在砂石路面与草地行驶时的滑转率明显大于在柏油路行驶。砂石路面较颠簸，草坪路面车轮容易打滑，也符合客观现实。

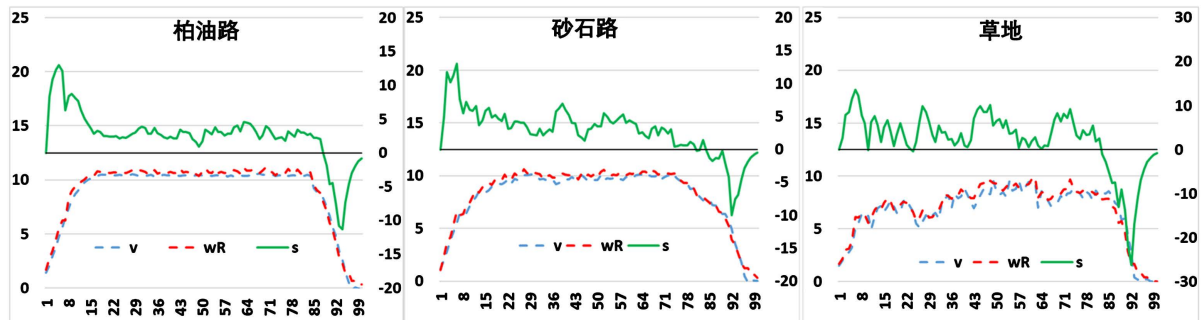


Figure 6. Different roads

图 6. 不同路面

#### 4. 总结与展望

本文提出一种基于 GNSS 与 MIMU 测算驱动轮滑转率的方法，对比目前通用的滑转率计算方法，它通过不同传感器的结合与卡尔曼滤波算法在保证实时性的基础上有效减少了测量中的有害噪声。经实验验证，得出了如下结论：

1) 同一路面状况下，速度越快，滑转率波动越小。速度稳定情况下，柏油路车滑转率波动较小，砂石路、草地滑转率波动较大。

2) 实测结果说明该方法测量的驱动轮滑转率客观准确地反映了车辆运动规律，消除了测量值中的有害噪声及扰动，结果具有动态实时性。

未来可以研究的内容有：1) 为提高不同作业路面适应性改进算法：目前算法中的测量噪声由先验统计得到，自适应型噪声观测器还有待研究。2) 为了不影响测量精度同时降低成本，改进测量手段：对比 GNSS 有无基站时的测速误差，提高无基站时系统的测速精度。

#### 参考文献

- [1] Frank, M.Z. (1972) Predicting Tractor Field Performance. *Transactions of the ASAE*, **15**, 249-252. <https://doi.org/10.13031/2013.37878>
- [2] Grisso, R.D., Yasin, M. and Kocher, M.F. (1996) Tillage Implement Forces Operating in Silty Clay Loam. *Transactions of the ASAE*, **39**, 1977-1982. <https://doi.org/10.13031/2013.27699>
- [3] Raheman, H. and Jha, S.K. (2007) Wheel Slip Measurement in 2WD Tractor. *Journal of Terramechanics*, **44**, 89-94. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2006.03.001>
- [4] Ringdahl, O., Hellstrom, T., Wasterlund, I., et al. (2012) Estimating Wheel Slip for a Forest Machine Using RTK-DGPS. *Journal of Terramechanics*, **49**, 271-279. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2012.08.003>
- [5] 周慧, 鲁植雄, 白学峰, 张广庆. 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.
- [6] 印祥, 卢博友, 钟以崇, 杨薇. 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, 31(4): 237-240.
- [7] 钟文军, 高强, 鲁植雄, 梅士坤, 刁秀永, 姜春霞. 路面行驶工况下拖拉机驱动轮滑转率的测试与分析[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(4): 130-136.
- [8] Pranav, P.K., Pandey, K.P. and Tewari, V.K. (2010) Digital Slip Meter for Agricultural 2WD Tractors. *Computers and Electronics in Agriculture*, **73**, 188-193. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.05.003>

- 
- [9] Berntorp, K. (2016) Joint Wheel-Slip and Vehicle-Motion Estimation Based on Inertial, GPS, and Wheel-Speed Sensors. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **24**, 1020-1027. <https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2470636>
- [10] 曹青梅, 周志立, 张明柱, 席志强, 郝建国. 拖拉机驱动轮滑转率估算法与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 35-41.
- [11] 张秋昭, 张书毕, 郑南山, 王坚. GPS/INS 组合系统的多重渐消鲁棒容积卡尔曼滤波[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(1): 162-168.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-677X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [dsc@hanspub.org](mailto:dsc@hanspub.org)