

基于多源数据结构融合的车轮滑转率测量方法

邱育东, 韩刚, 张征

(中国科学院自动化研究所, 北京 100190)

摘要: 滑转率是轮式车辆运动状态的重要参数, 该值过大严重影响牵引效率、油量消耗以及行驶安全; 实时精准检测车轮瞬时滑转率是车辆优化控制的关键技术; 当车辆在被各种土质或植被覆盖的田地里或复杂地形的环境中低速作业时, 传统方法难以精准测量该动态参数; 文中采用新测量方法: 采集卫星导航、微惯导和轮速等多源信息; 依据检测点的空间结构关系, 建立多源数据结构融合算法 (multi-source data structured fusion, MDSF); 实时测量各车轮的瞬时滑转率; 模拟仿真与实测试验的结果表明: (1) 轮向速度相对误差 2.43%, 轮转速相对误差 0.54%, 使滑转率误差小于 3.00%; (2) 实测数据准确反映车辆运动中的动力学关系, 实时体现左右车轮各自的动态特性。

关键词: 瞬时滑转率; 卫星导航系统; 惯导测量; 车轮转速; 结构数据融合

Vehicle Wheels Slip rate Measurement Based on Multi-source Data Structured Fusion

Qiu Yudong, Han Gang, Zhang Zheng

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The Wheels Slip rate is important parameter of vehicle movement state, when it is larger will seriously affect the traction efficiency, fuel consumption and driving safety. Real-time accurate detection of instantaneous wheel slip rate is the key technology of vehicle optimization control. When vehicle running at low speed in the field it's surface is covered by variety of soil and vegetation or other complex landform environment, the traditional method is difficult to accurately measure this dynamic parameter. The paper use a new method for measuring: Collect satellite navigation, micro inertial navigation and wheel speed etc. multi-source information; Based on the spatial structure relations between two measurement point, established Multi-source Data Structured Fusion algorithm (MDSF); Measure the instantaneous slip rate of each wheel in real-time. Simulation and experimental results show that: (1) The wheels move speed relative error is less than 2.43%, the wheel rotation speed relative error is less than 0.54%, the wheel slip rate error is less than 3.00%. (2) The measured data accurately presents the dynamic characteristics of the vehicle in motion and reflects the dynamic states of each wheel in real time.

Keywords: instantaneous slip rate; GNSS; inertial measurement unit; wheel speed; structured information fusion

0 引言

滑转率作为车轮滑转造成速度损失的比率, 是车辆主动安全系统的重要状态, 更是保持车辆作业效能的重要参数^[1]。它对于农业、林业、矿山开采、交通运输等行业中常见的轮式动力输出型车辆尤其重要, 例如农机行业中将滑转率作为拖拉机性能预测和控制参数^[2-3]。因此精准测量车轮滑转率很有意义且非常必要。

车轮滑转率测量涉及轮边速度与车轮前向速度 (简称轮向速度), 其误差小于后两者速度检测的相对误差之和。准确测量这两种速度是获得精准滑转率的关键。随着旋转编码器、霍尔式和光电式转速传感器广泛应用, 准确测量车轮转速不难做到^[4], 但要精确测量瞬时轮向速度并不容易, 传统方法以车辆速度代替。早期测车辆速度采用五轮

仪测速法或最小轮速法, 这些接触作业面的检测手段对在田野、矿区或林间等复杂环境下的车辆并不适用。后又出现各种非接触式测速法^[5], 其中较实用的为多普勒雷达测速^[6]及全球导航定位系统 (GPS) 测速^[7-8]。由于雷达探测受凹凸不平反射面影响较大, 现多以 GPS 测量车辆速度, 经滤波融合加速度等信息后作为轮向速度^[9]; 还可增加噪声观测器以自适应相对稳定的土壤条件与作业过程, 可使测量精度提高到 5%^[10]。然而对于田间野外的车辆, 常常在起伏、颠簸坡面或转向中进行作业, 此时土质条件和作业工况多变, 其车辆速度不能作为左、右侧实际的轮向速度^[11-12]; 况且各轮接地路况不同使轮速差变速器传动力矩多变, 车轮转速有差异, 各车轮的滑转情况并不相同, 必须针对各车轮独立测算才真实精准。另外在车辆低速作业时同样的测速偏差其相对误差更大, 使滑转率测量值对扰动

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-11-05。

基金项目: 国家重点研发计划智能农机专项 (2016YFD0700100)。

作者简介: 邱育东 (1961-), 男, 福建龙岩人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事自动控制和精密检测技术方向的研究。

引用格式: 邱育东, 韩刚, 张征. 基于多源数据结构融合的车轮滑转率测量方法[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 49-53, 58.

更敏感；因此卫星天线随车辆上下跳动与左右摆动也对测量造成干扰。

为此本文提出针对低速车辆车轮滑转率的新测量方法：通过卫星导航、微惯导单元和轮转速检测等部件采集车辆行进时的方向、姿态角、角速度和速度、加速度等多种动态信息，依据各车轮与车体上相关测算点的空间关系，建立多源数据结构化融合算法（Multi-source Data Structured Fusion, MDSF），实时地测量车辆各车轮的瞬时滑转率。

1 设计滑转率新测量方法

1.1 车轮滑转率检测装置构成

滑转率检测装置系统内部结构设计如图 1 所示，包括全球导航卫星系统（GNSS, RTK 载波相位差分测速）的基站与移动站、微惯性测量单元（MIMU, 内有加速度计和陀螺仪）、左右车轮转速检测单元和滑转率测算单元。其中 GNSS 组合 MIMU 测量车辆方位、速度、加速度、姿态角和角速度等信息，转速检测单元测量左右轮转速。

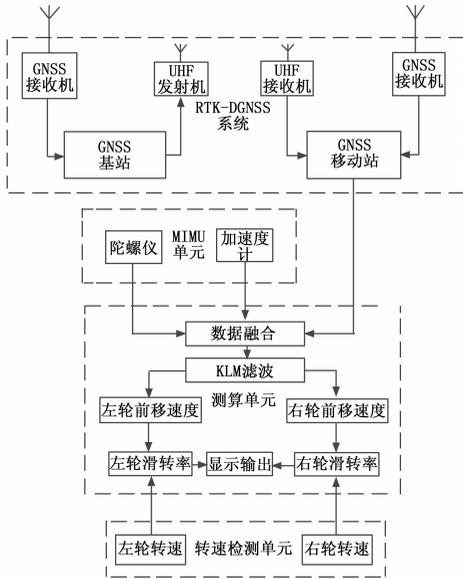


图 1 滑转率检测系统构成图

1.2 车辆运动状态测点布局

采集信息测点布局参见图 2。GNSS 移动站的天线安装于后轮车轴中点正上方车顶。此处车向速度 V_g （简称车速）为地理系各轴向车辆速度矢量在车头方向（车载系 Y 轴）上投影之和：

$$V_g = V_e \sin\psi \cos\theta + V_n \cos\psi \cos\theta + V_u \sin\theta \quad (1)$$

式中， V_e, V_n, V_u 即车速在地理系（东北天）轴向各分量； ψ 是车航向角、 θ 是俯仰角。均由 GNSS 测得。

含 MIMU 单元的检测仪则位于天线正下方，MIMU 坐标按图中标注车载系方向调整。检测仪距地面高度 h_0 ，与天线的高差 h_1 ，此处前向车速为 V_1 。由 MIMU 测得此处前向加速度 a_1 ，车体绕 X、Z 轴角速度 ω_x, ω_z 。轮转速检测单元测得左、右后轮转速分别是 W_L, W_R ，后轮半径为 r ，

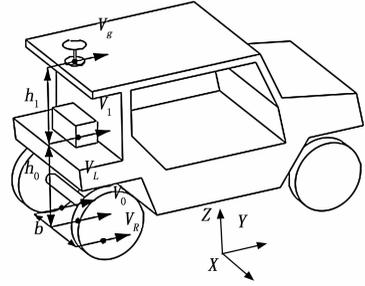


图 2 车辆载体与信息采集点空间关系

即有左、右轮边速分别为 rW_L, rW_R 。左、右后轮接地点的轮向速度分别为 V_L, V_R ，左右后轮间距为 b ，后轮轴中心在地面正投影点的速度为 V_0 ，速度 V_0, V_1, V_g 与速度 V_L, V_R 有如下关系式：

$$V_1 = V_g + \omega_x h_1 \quad (2)$$

$$V_0 = V_1 + \omega_x h_0 \quad (3)$$

$$V_L = V_0 - \omega_z \frac{b}{2} = V_1 + \omega_x h_0 - \omega_z \frac{b}{2} \quad (4)$$

$$V_R = V_0 + \omega_z \frac{b}{2} = V_1 + \omega_x h_0 + \omega_z \frac{b}{2} \quad (5)$$

这些关系反映车辆速度、车辆动态和各测点空间结构尺寸间的内在联系，也是多源数据按结构进行融合的基础。

1.3 建立多源动态数据结构融合算法

将采样间隔 dt ($=0.2$ s) 时间所得车辆运动变量分组：状态量 $X(n) = [V_1(n) \ a_1(n) \ \omega_x(n) \ \omega_z(n)]^T$ ，观测量 $Z(n) = [V_g(n) \ a_1(n) \ \omega_x(n) \ \omega_z(n)]^T$ ，测算量 $Z_1(n) = [V_g(n) \ V_L(n) \ V_R(n)]^T$ 。

依据这些变量内在关系构建系统模型：

$$\begin{aligned}
 X(n+1) &= AX(n) + W \\
 Z(n) &= HX(n) + V \\
 Z_1(n) &= H_1X(n)
 \end{aligned} \quad (6)$$

其中： $A = \begin{bmatrix} 1 & dt & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ — 状态转移矩阵

$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -h_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ — 观测矩阵

$H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -h_1 & 0 \\ 1 & 0 & h_0 & -\frac{b}{2} \\ 1 & 0 & h_0 & \frac{b}{2} \end{bmatrix}$ — 测算矩阵

W 为过程噪声， V 为测量噪声

通过卡尔曼滤波融合测算 $Z_1(n)$ 中的 V_g, V_L, V_R 值：

$$\begin{aligned}
 \hat{X}(n | n-1) &= A\hat{X}(n-1 | n-1) \\
 P(n | n-1) &= AP(n-1 | n-1)A^T + Q \\
 K(n) &= P(n | n-1)H^T[HP(n | n-1)H^T + R]^{-1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P(n|n) &= [I - K(n)H]P(n|n-1) \\
 \hat{X}(n|n) &= \hat{X}(n|n-1) + \\
 &K(n)[Z(n) - H\hat{X}(n|n-1)] \\
 Z_1(n) &= H_1\hat{X}(n|n)
 \end{aligned} \tag{7}$$

其中: $Q = [Q_v \quad Q_a \quad Q_\omega \quad Q_\omega]^T$ 为过程噪声方差;
 $R = [R_v \quad R_a \quad R_\omega \quad R_\omega]^T$ 为测量噪声方差;
 $\hat{X}(n|n-1), \hat{X}(n|n)$ 为预测与估计状态;
 $P(n|n-1), P(n|n)$ 为预测与估计协方差;
 $K(n)$ 为滤波增益。

将 V_L, V_R 及采样同时测的轮转速 W_L, W_R 代入下式可解算左、右轮滑转率 S_L, S_R :

$$S_L = \frac{rW_L - V_L}{\max(rW_L, V_L)} \times 100\% \tag{8}$$

$$S_R = \frac{rW_R - V_R}{\max(rW_R, V_R)} \times 100\% \tag{9}$$

该算法的特点与优势: (1) 用车向速度 V_g 而非车辆速度, 有利于消除低速车辆上下颠簸和侧向摇摆的影响; (2) 融合多种信息 (涉及车向速度、车向加速度、车体俯仰角速和转向角速) 反映车辆变速、俯仰、转向等动态变化; (3) 考虑测点的位置、左右轮距等结构关系, 转成车轮接地地点轮向速度; (4) 独立检测各轮转速并解算各车轮瞬时滑转率; (5) 融合中卡尔曼滤波环节可降低噪声干扰并有补偿局部信息偏差作用。

2 实验仿真、测试台检验与实际路测

研发的成套测量装置 (含卫星差分基站和车载移动检测仪) 及试验车辆, 如图 3 所示。经实验仿真、测试台检测和实际路面测试等多种方式获得实测数据, 并分析检验评估新方法的有效性及其性能改善情况。



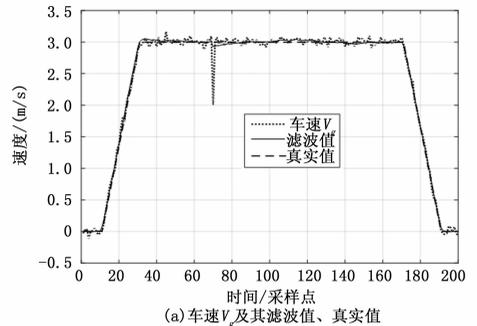
图3 成套测量装置及试验车辆

2.1 仿真实验评估测速精度

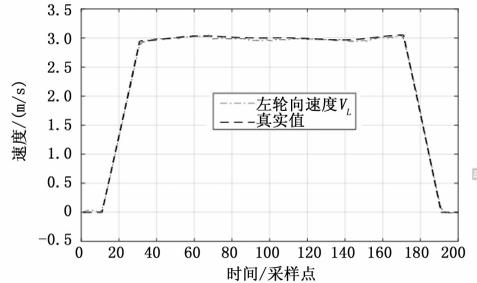
2.1.1 模拟在道路上的直线行驶过程

仿真一: 模拟车辆沿直线从静止起步后加速—匀速 ($V_g = 3 \text{ m/s}$)—减速到停车过程。参照俯仰及转向工况加小幅波动: $\omega_x = 0 \pm 0.02 \text{ rad/s}$; $\omega_z = 0 \pm 0.05 \text{ rad/s}$ 。仿颠簸路状对车速加约 5% 幅值的随机噪声且在 14 秒 (采样点 70) 处加 -1 m/s 突变扰动, 其它测值按实际加噪声 (加速度 3%、角速度 2%)。以合适协方差、测量噪声方差、过程

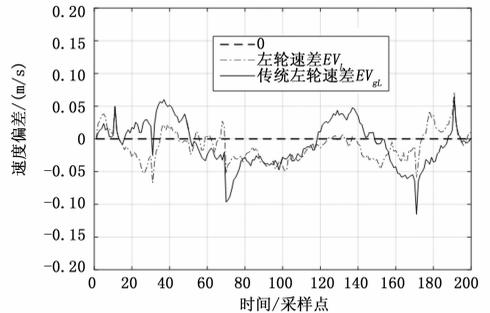
噪声方差, 经 MATLAB 仿真实现 MDSF 算法测得各模拟结果绘于图 4 (a) ~ (e)。



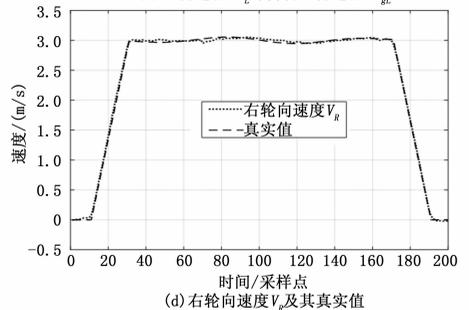
(a) 车速 V_g 及其滤波值、真实值



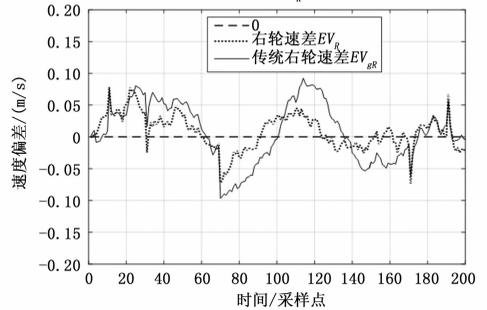
(b) 左轮向速度 V_L 及其真实值



(c) 左轮速差 EV_L 与传统左轮速差 EV_{g_L}



(d) 右轮向速度 V_R 及其真实值



(e) 右轮速差 EV_R 与传统右轮速差 EV_{g_R}

图4 仿真直线行驶过程的曲线

图 4 (a) 为车速 V_g 测量值及其滤波值、真实值曲线, 滤波融合后测量噪声及突变干扰得到明显消除。图 4 (b) 为左轮向速度 V_L 及其真实值。图 4 (c) 中的点划线为左轮速差 EV_L , 最大值为 0.072 m/s ; 实线为车速 V_g 与左轮真实速度的偏差 EV_{g_L} (即传统算法的左轮速差), 最大值为 0.124 m/s 。图 4 (d) 为右轮向速度 V_R 及其真实值。图 4 (e) 中的点连线条为右轮速差 EV_R , 最大值为 0.073 m/s ; 实线为传统右轮速差 EV_{g_R} , 最大值为 0.098 m/s 。按平均轮向速度 3.0 m/s 计算: 新算法的最大相对误差为 2.43% , 传统算法的最大相对误差为 4.13% 。说明区别左右轮向速度的新算法精度要比用车速替代轮向速度的传统算法精度高。

2.1.2 模拟在场地上的逆时针绕行过程

仿真二: 模拟车辆逆时针以波动车速绕行 ($V_g = 3.0 \pm 0.03 \text{ m/s}$), 转向角速度约 16 秒一圈 ($\omega_z = 0.4 \text{ rad/s} \pm 0.02 \text{ rad/s}$), 俯仰角略摆动 ($\omega_x = 0 \pm 0.02 \text{ rad/s}$); 各测量值也仿颠簸路况加入适量的噪声和突变干扰。经 MATLAB 仿真测算得各模拟结果绘于图 5 (a) ~ (d)。

图 5 (a) 中车速 V_g 的噪声和突变扰动已明显消除。图 5 (b) 中实线是滤波后车速 V_g , 点划线是左轮向速度、点连线条是右轮向速度, 虚线是各轮真实值; 逆时针绕行时, 右轮向速度大于左轮向速度。图 5 (c) 中点划线为左轮速差 EV_L , 左轮最大偏差 0.069 m/s ; 实线为传统算法左轮速差 EV_{g_L} , 其左轮最大偏差 0.24 m/s 。转弯时传统算法偏差比新算法的平均多 0.2 m/s 。图 5 (d) 中点连线条为右轮速差 EV_R , 右轮最大偏差 0.07 m/s ; 实线为传统算法右轮速差 EV_{g_R} , 其右轮最大偏差 0.28 m/s 。同样传统法偏差平均多 0.2 m/s ; 以左轮速均值为 2.8 m/s , 右轮速均值为 3.2 m/s , 算得新法最大相对误差 2.32% , 传统法最大相对误差 8.75% ; 按偏差平均多出的量计算, 传统法的相对误差要比新法的平均多 6.67% 。

总之有: 不管车辆直行或转向, 新算法的轮向速度相对误差小于 2.43% 。而受车辆转向等姿态变化影响, 传统用车辆速度替代轮向速度的相对误差达到 8.75% , 两种算法平均相差 6.67% 。转向越快、左右轮速差异越大, 新算法的优势越明显。

2.2 基准实验台检验转速精度

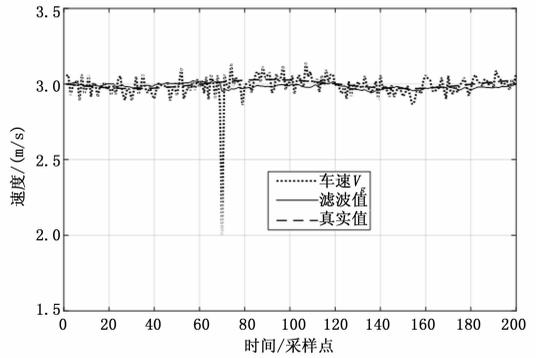
在基准转速实验台上实测并比对车轮转速检测单元的精度, 见表 1。

表中以作业范围的五档轮转速为测量基准, 列出测得高精度转速表值与轮转速测量单元 100 个测点中最大、最小值, 计算相对误差的范围。检验结果表明, 轮转速检测相对误差小于 0.54% 。综合之前结果, 滑转率测量误差小于 3.00% 。

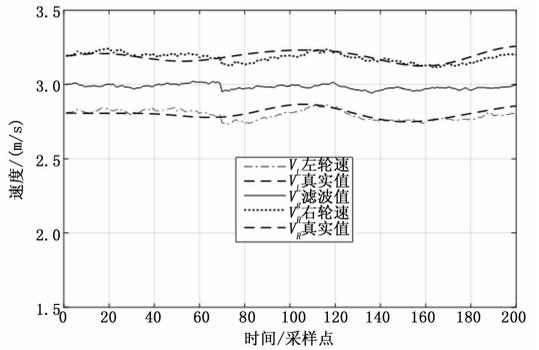
2.3 车载测量装置实地测验

2.3.1 车辆在实际路面上直线行驶过程

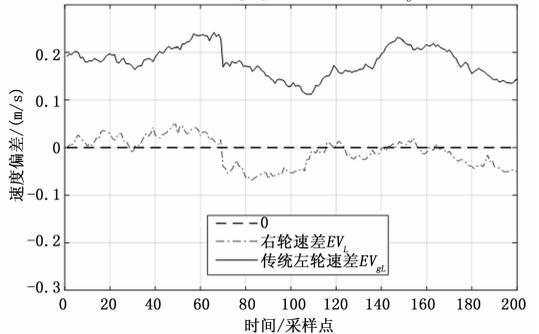
驾驶车辆在实际道路上按加速—稳速—减速做直线行



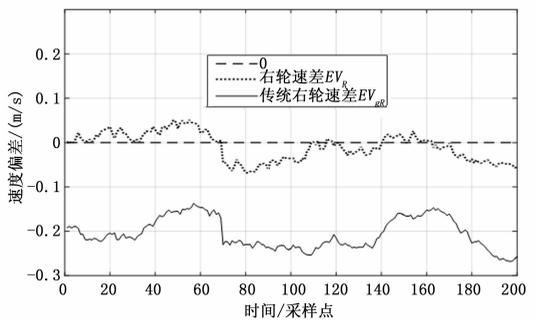
(a) 车速 V_g 及其滤波值、真实值



(b) 左右轮向速度 V_L, V_R 及其真实值、车速 V_g 滤波值



(c) 左轮速误差 EV_L 与传统法左轮速差 EV_{g_L}



(d) 右轮速误差 EV_R 与传统法右轮速差 EV_{g_R}

图 5 仿真逆时针绕行过程的曲线

进试验。将测量装置实测数据绘于图 6 (a) ~ (c) 中, 结果分析如下:

图 6 (a) 为实测车速 V_g 、车载检测仪处速度 V_1 及加速度 a_1 的曲线。它直观反映了运动过程中的加速段、稳速段和减速段。图中表明数据融合后, 速度 V_1 相对车速 V_g 作了修正 (数据融合中加速度对 GNSS 测速有补偿作用, 在

表 1 实测车轮转速相对误差

五挡基准转速	测试仪测得 100 点, 取其最大、最小值				统计结果
	最大值 (RPM)	正相对误差 (%)	最小值 (RPM)	负相对误差 (%)	
29.60	29.70	0.34	29.48	-0.42	<0.43
131.40	131.85	0.34	131.10	-0.23	<0.35
232.00	233.25	0.54	231.60	-0.17	<0.54
401.80	402.90	0.27	401.55	-0.06	<0.28
520.30	521.55	0.24	520.05	-0.05	<0.25

天线信号受到干扰时有校正效果)。图 6 (b) 中是左轮向速度 V_L 和左轮边线速 rW_L 及解算出的左轮滑转率 S_L 曲线, 图 6 (c) 是右轮相关曲线。图中加速段正滑转率 (最大正值 $>10\%$) 说明车辆加速受正向驱动力; 减速段负滑转率 (最大负值 $<-10\%$) 表示车辆减速受反向摩擦阻力; 匀速段滑转率小幅波动 ($\pm 4\%$ 之内), 车辆仅克服少量阻力而依靠惯性维持匀速运动。

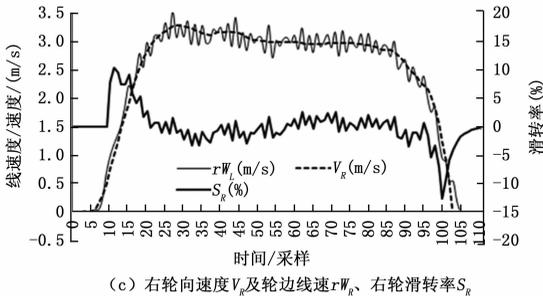
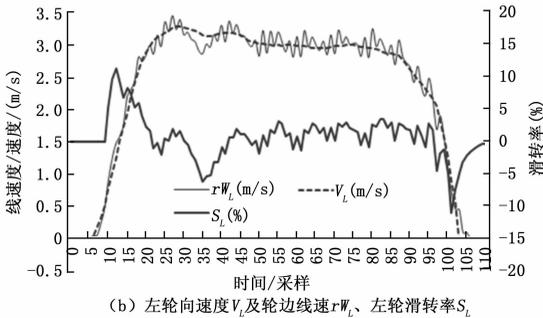
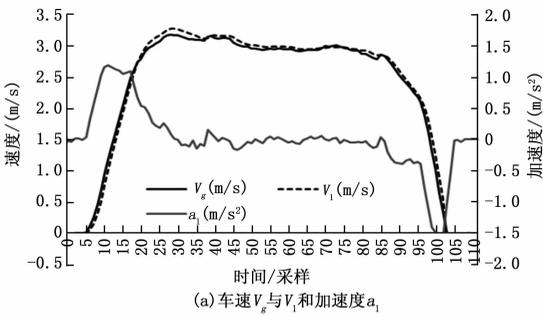


图 6 车辆直线行驶的实测曲线

分析表明 MDSF 算法可弥补数据偏差而提高滑转率测量精度。其实测数据准确地反映车辆运动中的动力学关系。

2.3.2 车辆在平场地上绕 8 字行驶过程

为展示比较行驶中左、右车轮的差异, 驾驶车辆绕 8 字形线路做稳速行进试验。车辆速度基本按 2.7 m/s 匀速, 绕完 8 字为一圈, 周期约 27 s 左右。截取两个周期 (采样 270 点) 实测数据绘于图 7 (a) ~ (b) 中, 结果分析如下:

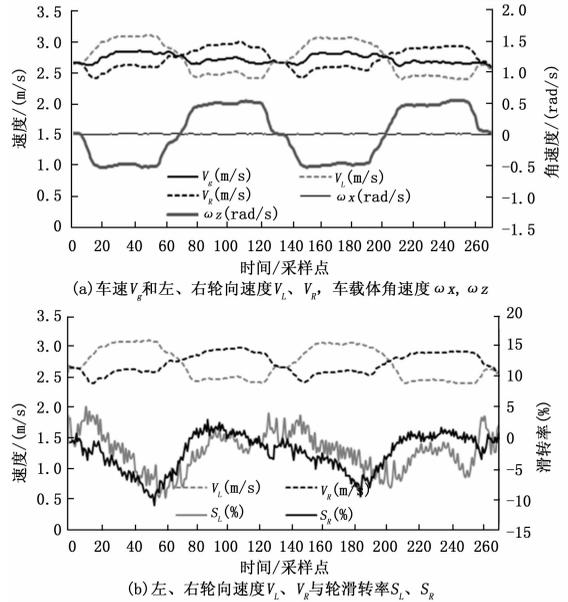


图 7 车辆绕 8 字转圈行驶的实测曲线

图 7 (a) 为车速 V_g 、左、右轮向速度 V_L 、 V_R 的对比曲线及对应时段车载体角速度 ω_x 、 ω_z 的变化曲线。车辆以 2.7 m/s 稳速行进, 此时左、右轮向速度随顺逆绕向交替变化, 车头航向角速度 ω_z 相应呈现正反变化; 直观反映车辆绕行时外侧轮速大于内侧轮速。图 7 (b) 中绘出对应时刻的左、右轮滑转率 S_L 、 S_R 曲线。对比两轮滑转率值得出一个规律: 绕行中外侧轮 (速度大) 滑转率基本略大于内侧轮滑转率。内、外轮交换时其滑转率曲线也马上交叉。这客观反映转弯中外轮比内轮滑转量更大, 外轮滑转量大可产生更大摩擦力使车辆向内侧转弯。两轮滑转率同时也随路面状况波动但幅度不大 ($\pm 7\%$ 以内), 符合稳速运动的特点。分析说明 MDSF 方法的实测数据可实时体现左右车轮各自的动态特性。

3 结束语

模拟仿真与实测试验的结果表明: (1) 不论车辆直行还是转向, 轮向速度检测相对误差小于 2.43%; 轮转速检测相对误差小于 0.54%, 滑转率测量误差小于 3.00%。(2) MDSF 算法可弥补数据偏差而提高滑转率测量精度。其实测数据准确地反映车辆运动中的动力学关系, 可实时体现左右车轮各自的动态特性。

参考文献:

[1] 徐锐良, 罗跃辉, 徐立友. 基于松软路面的滑转率对拖拉机性能的影响 [J]. 农机化研究, 2014 (1): 230-233.

(下转第 58 页)