文章编号:1004-2474(2019)01-0141-05

基于运动学约束的履带通信车组合导航研究

武 萌¹, 尹训锋²

(1. 陆军装甲兵学院 兵器与控制系,北京 100072;2. 91917 部队,北京 102401)

摘 要:履带通信车由于结构限制,存在滑移、滑转问题,受里程计安装位置及传动比影响,在不同运动状态下,履带通信车里程计输出与实际车辆行驶距离不同,直接采用履带通信车里程计输出作为辅助导航信息会降低 捷联惯导组合导航精度。该文在分析履带通信车不同运动状态下等效转向半径及里程计输出与实际履带通信车 行驶速度关系的基础上,提出了履带通信车运动状态识别判断方法,根据判断出的运动状态,提出了基于履带通信 车运动学约束的里程计修正补偿法,该方法能够对履带通信车的不同运动状态进行识别,并对里程计输出进行实 时修正,对履带通信车滑移和滑转产生的横向速度进行补偿。实车试验验证了该组合导航方法的有效性。

关键词:捷联惯导;组合导航;履带通信车;运动学约束 **中图分类号:**TN911;TM248;V249.3 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.01.032

Research on Integrated Navigation of Tracked Communication Vehicles Based on Kinematic Constraint

WU Meng¹, YIN Xunfeng²

Dept. of Armament and Control Engineering, Armored Force Academy of Land Forces, Beijing 100072, China;
 2.91917 Army, Beijing 102401, China)

Abstract: Due to the structure limitation, the tracked communication vehicle has the problems of the skids and slips. Influenced by the installation position of the odometer and different transmission ratio, the output of odometer is different from the actual travelling distance of the tracked communication vehicle under different motion states. The accuracy of the SINS integrated navigation may be reduced by directly using the odometer output of the tracked communication vehicle as auxiliary navigation information. Based on the analysis of the equivalent steering radius of the tracked communication vehicle in different motion states and the relationship between the output of the odometer and the actual speed of the tracked communication vehicle, a method for identifying and judging the motion state of tracked communication wehicle is proposed in this paper. According to the judged motion state, an odometer correction compensation method based on kinematic constraints of tracked communication vehicle is proposed. The method can recognize the different motion states of tracked communication vehicle, correct the output of odometer in real time, and compensate the lateral velocity caused by the skids and slips. The actual vehicle test verifies the effectiveness of the integrated navigation method.

Key words: SINS; integrated navigation; tracked communication vehicle; kinematic constraint

0 引言

履带通信车辆由于特殊的结构特点,可以使车辆平稳快速安全通过各种复杂的地形,完成各种通信保障任务。车载里程计是完全自主式测量传感器,适合应用在 GPS 受限且自主性要求高的组合导航领域。国外许多军用车载导航系统采用捷联惯导/里程计组合导航,能达到较高的定位定向精

度^[1]。受履带车辆结构影响,在履带车捷联惯导/里 程计组合导航过程中,履带车辆在不同运动状态下, 里程计输出信息与实际行驶距离并不完全一致,里 程计信息如不能及时有效处理,会降低组合导航精 度,严重时会引起系统发散。采用相应的约束补偿 算法可有效处理里程计错误信息,提高车辆在不同 运动状态下的导航定位精度^[2-3]。

收稿日期:2018-04-10

作者简介:武萌(1981-),女,山东泰安人,讲师,博士,主要从事惯性导航与制导的研究。

履带车辆转向时高速侧履带速度大于车辆质心 速度,高速侧履带相对地面产生后向的滑转,而低速 侧履带速度小于车辆质心速度,低速侧履带相对地 面产生前向滑移^[45]。滑转和滑移会使履带车辆在 不同运动状态下的里程计输出与车辆实际行驶速度 存在差异。本文根据履带车辆的不同运动状态,提 出了利用捷联惯导解算输出对履带车辆行驶状态进 行判断,并根据判断结果对受传动比影响引起的里 程计输出与实际车辆行驶速度的差异进行修正,对 履带车辆滑转、滑移产生的横向速度进行补偿,实现 了基于运动学约束的履带车辆捷联惯导/里程计组 合导航。

1 履带车辆运动特点分析

履带车辆通常利用传动装置分别改变高速和低 速履带的速度来实现不同的运动状态。履带车辆传 动装置主要实现直行变速和转向两方面的功能,可 分为单流传动装置和双流传动装置[6]。目前我国使 用单流传动装置履带通信车辆较多,单流传动装置 的特点是转向机构与变速机构串联,车辆发动机产 生的动力经传动箱传给主离合器,当主离合器闭合 时,动力部分传给变速箱,里程变速表蜗轮安装在变 速箱上。控制履带车辆按不同工况运行的关键部件 是行星转向机^[7]。高、低速履带两侧行星转向机各 有一个操纵杆,分为最前、Ⅰ档和Ⅱ档3个档位,各 档位与运动状态的关系如表1所示。履带车辆行星 转向机的主要功能是在不改变变速箱档位的情况 下,实现车辆的转向、制动和停车。由于车辆里程速 度表安装在变速箱内,受履带车辆传动比影响,在某 些特定的状态下,里程计的输出与车辆的实际行驶 路程并不相同,在捷联惯导/里程计组合导航过程 中,需对这种现象进行分析和补偿。

> 表1 行星转向机操纵档位与履带车 运动状态的关系

序号	高速侧档位	低速侧档位	车辆运动状态
1	最前	最前	高速直线运动
2	I 档	I 档	低速直线运动
3	Ⅱ档	Ⅱ档	停车
4	最前	I 档	弧形转向
5	最前	Ⅱ档	原地转向
6	最前	Ⅰ档~最前档	分离转向
7	I 档	I 档~Ⅱ 档	低速分离转向
8	I 档	Ⅱ档	低速原地转向

2 捷联惯导/里程计组合导航下履带车辆运动状态判断及里程计输出修正补偿

在车载捷联惯导系统中,选取地心坐标系 i 为 惯性坐标系,东北天地理坐标系 n 为导航坐标系,载 体坐标系为 b,车体坐标系为 m,地球自转角速率为 ω_{ie} 。假设履带车辆短时前向速度为 v_{y}^{i} 、航向变化角 为 \dot{q} ,等效转向半径为 ρ ,向心加速度为 \tilde{a}_{c} ,则 v_{y}^{i} 、 \dot{q} 、 ρ 、 \tilde{a}_{c} 的表达式为

$$\rho = \frac{v_y^b}{\dot{\varphi}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{p}_{\boldsymbol{y}}^{\boldsymbol{b}} = (\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{n}}^{\boldsymbol{b}} \widetilde{\boldsymbol{V}}^{\boldsymbol{n}})_{2} \tag{2}$$

$$\dot{\varphi} \approx \tilde{\omega}^b_{bz}$$
 (3)

$$\tilde{a}_{c} = \tilde{f}_{x}^{b} + (\boldsymbol{C}_{n}^{b}\boldsymbol{g}^{n})_{1}$$

$$\tag{4}$$

式中: C_n^n 为车辆姿态矩阵; \tilde{V}^n 为捷联惯导解算的 n系速度; $\tilde{\omega}_{bz}^b$ 为捷联惯导 z 轴陀螺敏感的角速度; \tilde{f}_x^c 为捷联惯导 x 轴加速度计敏感的加速度; g^n 为重力加速度在 n 系的分量; (•);为取该向量的第 j个元素。

在捷联惯导/里程计组合导航状态下,可根据式 (1)~(4)对履带车辆的行驶状态进行判别,并根据 不同运动状态对里程计输出信息进行修正。

履带车辆的里程计安装在车辆变速箱内,里程 计测量得到的速度等效于高速侧履带中心点的速 度,由于车辆具有较大尺寸杆臂效应。假设履带车 辆的杆臂为μ,则捷联惯导解算速度在 *m* 系的分量 *v*^{*m*}_y 为

$$v_{y}^{m} = (\boldsymbol{C}_{b}^{m} \boldsymbol{C}_{n}^{b} \widetilde{\boldsymbol{V}}^{n} + \boldsymbol{\omega}_{\boldsymbol{\omega}}^{b} \times \boldsymbol{\mu})_{2}$$

$$(5)$$

式中:C^m为捷联惯导与车体间的姿态矩阵; ω^b_a为捷 联惯导相对地球坐标系 e 的角速率。

2.1 低速直线运动判断及里程计信息修正

履带车辆高速直线行驶时,里程计速度 v_o 与 v'_y 相等。由于受变速传动比影响,履带车辆低速直线 行驶时, v_o 为 v'_y 的 1.42 倍^[8]。履带车辆直线行驶 时 ρ 可认为无穷大,设定最大转弯半径门限为 R_{max} , 则履带车辆低速直线运动的判据为

$$\begin{cases} |\rho| \gg R_{\max} \\ v_{0} \ge 1.42v_{\nu}^{b} \end{cases}$$

$$\tag{6}$$

履带车辆低速行驶情况下,采用下式对里程计输出进行修正:

$$v_{\rm o} = v_{\rm y}^b \tag{7}$$

2.2 原地转向运动判断

忽略履带车辆在转向过程中车辆质心偏离的影

响,履带车辆实际的转向半径[8]为

$$r = \frac{(1 + \lambda a_1) + K(1 + \lambda a_2)}{1 + K} r_t$$
(8)

式中: a_1, a_2, λ, K 为修正系数; r_1 为理论转向半径。 履带车辆原地转向半径 $R_1 = B/2, B$ 为履带跨距, $r_1 = R_1$ 。

定义相对转向半径为

$$\rho_{\rm r} = \frac{r_{\rm t}}{B} \tag{9}$$

则履带车辆原地转向时 $\rho_r = 0.5$ 。假设履带车辆在水泥地面上行驶,将水泥地面下 $\rho_r = 0.5$ 时的修正系数 $a_1, a_2, \lambda, K^{[8]}$ 代入式(8)可得

$$r \approx 1.531 R_{\rm I} \tag{10}$$

考虑干扰影响,ρ可能大于r,但小于弧形转向 半径 R_n,履带车辆原地转向的判据为

$$r \leqslant |\rho| < R_{\rm II} \tag{11}$$

履带车辆原地转向时横向速度 $v'_x \neq 0$,即车辆 存在滑转和滑移,此时 $v_o > v'_y$,里程计的输出不能 实际体现履带车辆的运动状况。当判断出履带车辆 原地转向时,不进行里程计输出修正,捷联惯导/里 程计组合导航不进行量测更新,仅惯性导航姿态 更新。

2.3 弧形转向的判断

履带车辆弧形转向理论转向半径为 R_{II} = 2.88B, ρ_r =2.88,将水泥地面下 ρ_r =2.88 的修正系数 a_1 , a_2 , λ ,K代入式(8)可得

 $r \approx 1.549 \ 0R_{\rm II} \tag{12}$

受干扰影响,ρ可能大于r,由于弧形转向时高 速侧履带速度为低速侧履带速度的1.42倍,履带实 际转向半径不会比r大很多,设定弧形转向判断门 限值为

$$R_{\rm II}^{\rm max} = 2R_{\rm II} \tag{13}$$

则履带车辆弧形转向运动的判据为

$$r \leqslant |\rho| \leqslant 2R_{\mathrm{II}}^{\mathrm{max}} \tag{14}$$

受履带车辆滑转和滑移影响,履带车辆弧形转向时 $v_x^{\flat} \neq 0$, v_o 与 v_y^{\flat} 存在速度差,在履带车辆弧形转向时,需对车辆滑转和滑移产生的横向速度及前向滑动速度进行补偿和修正。

2.4 分离转向的判断

分析履带车辆实际分离转向半径较复杂,为简 化分析,假定履带车辆转向半径大于2倍的弧形转 向半径时即为分离转向,运动判据为

$> 2R_{II}$	(15)

在履带车辆分离转向时,需对履带车辆产生的 横向速度及前向滑动速度进行补偿和修正。

2.5 大角度转向的判断

p

当履带车辆航向角较大时,履带车辆的滑移 和滑转较大,进行里程计组合导航会引起捷联惯 导姿态更新剧烈变化及导航误差,严重时甚至会 发散,此时应丢弃里程计修正,采用纯惯性导航。 航向角的变化通过捷联惯导输出的方位角进行判 断,设定大航向角门限值为 δψmax,则大角度转向判 据为

 $| \varphi_{k+1} - \varphi_k | > \delta \varphi_{\max}$ (16) 式中 φ_k 为 k 时刻的航向角。

3 基于履带车辆运动学约束的组合导航 算法

履带车辆低速直线行驶时采用式(7)对里程计 输出进行修正;原地转向以及大角度转弯时,丢弃里 程计信息,进行纯惯性导航和姿态更新,不进行量测 更新;弧形转向或分离转向时,受滑转和滑移影响, 车辆会产生横向速度,不考虑质心偏移,履带车辆质 心点的横向速度在 *m* 系的投影^[4]为

$$v_x^m = \frac{v_{x1}^b + v_{x2}^b}{2} = -\dot{\varphi}L \tag{17}$$

式中: v^b_{x1}, v^b_{x2} 分别为高、低速侧履带横向速度; L 为 履带接地长度。

履带车辆质心点的前向速度 v_y^m 在 m 系的投 影^[4]为

$$v_{y}^{m} = \frac{v_{y1}^{b} + v_{y2}^{b}}{2} + \frac{\dot{\varphi}}{2} \left(A_{1} - A_{2}\right)$$
(18)

式中: $v_{y_1}^{b}$, $v_{y_2}^{b}$ 分别为高、低速侧履带前向速度; A_1 , A_2 为车辆横向偏移。

从式(17)、(18)可看出,履带车辆转向产生的 v_x^m 仅与 $\dot{\varphi}$ 有关,而 v_y^m 不仅与 $\dot{\varphi}$ 有关,还与 A_1 , A_2 有 关。在水泥地面弧形转向时, $A_1 \approx 0.452$ 0 和 $A_2 \approx$ 0.861 5^[8],则式(18)可表示为

 $v_y^m \approx 0.852 \ 1v_0 + 0.204 \ 8\dot{\varphi}$ (19)

履带车辆弧形转向的转弯半径为 $\rho \approx 1.5R_{II} \approx$ 12.26(m),将式(1)代入式(19)可得履带车辆弧形 转向时 v_y^{v} 为

 $v_y^m \approx 0.868 \ 8v_o \tag{20}$

高、低速履带的滑动率均随 ρ_r 的增大而减小, 当 $\rho_r = \infty$ 时,等效于履带车辆直线行驶,履带车辆不 存在滑移和滑转。履带车辆分离转向时ρ_r比弧形转向大,在履带车辆弧形转向的情况下,可将履带车辆偏移引起的速率等效为里程计噪声,此时有如下 关系成立^[8]:

$$\frac{\rho + B/2}{\rho - B/2} = \frac{v_{y_1}^b}{v_{y_2}^b} \tag{21}$$

由于履带车辆里程计测量速度等于高速侧履带 速度,由式(21)可得

$$v_{y_2}^{b} = rac{
ho - B/2}{
ho + B/2} v_{y_1}^{b} pprox rac{
ho - B/2}{
ho + B/2} v_o$$
 (22)

将式(22)代入式(18),忽略履带车辆偏移引起的速率影响,可得分离转向时的 v^m 为

$$v_y^m \approx \frac{\rho}{\rho + 0.5B} v_\circ \tag{23}$$

定义修正后里程计测量输出为

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{o}}^{m} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{x}^{m} & \boldsymbol{v}_{y}^{m} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(24)

根据履带车辆的运动状态,将式(7)、(17)、 (20)、(23)分别代入式(24),作为履带车辆组合导航 里程计测量修正输出,与捷联惯导解算的速度之差 作为观测量进行捷联惯导/里程计组合导航。

4 实验验证

选用某型光纤陀螺捷联惯导惯性测量单元 (IMU),其光纤陀螺常值漂移为0.02(°)/h,随机噪 声方差为0.01(°)/h,加速度计常值漂移为1× $10^{-4}g(g=9.8 \text{ m/s}^2),随机噪声方差为1×10^{-5}g$ 。 IMU 安装在某型履带通信车辆上,并预先进行标 定,里程计刻度因子标定值 $K_D=0.010.8 \text{ m/p}$ 。在 某训练场地行驶4000 s,最大跑车速度50 km/h, 共进行2组机动方式不同的跑车实验,一组数据进 行无修正组合导航,另一组数据采用履带车辆运动 学约束和里程计修正组合导航,采集实验数据离线 分析结果如图1~3 所示。





图 1 为 b 系的里程计测量速度和捷联惯导解算 速度。图 2 为捷联惯导在 b 系 x 轴的解算速度。由 图 2 可知,履带车辆 b 系横向速度并不为 0,表明履 带车辆跑车期间受滑移和滑转影响,不再满足车辆 的横向速度为 0 的运动学约束,需根据履带车辆的 运动学约束,对里程计输出进行修正。

图 3 为导航定位结果。由图可知,由于受履带 车辆转向滑移和滑转影响,无约束组合导航的经度 定位误差约 100 m,纬度定位误差约 60 m,此实验 场地为水泥地面,路况较好,捷联惯导/里程计组合 导航定位精度误差未得到充分释放,在实际长途行 车时,特别是复杂路况下,履带车辆捷联惯导/里程 计组合导航的定位误差比实验结果可能还要大。采 用修正组合导航经度定位误差约 60 m,纬度误差约 30 m。采用修正组合导航的定位精度明显优于无约 束组合导航的定位精度。

5 结束语

本文在分析履带车辆的行驶特点的基础上,利 用捷联惯导的解算输出对履带车辆行驶状态进行判 断,根据判断结果对履带车辆滑转、滑移引起的里程 计输出误差进行修正,对受传动比不同影响,引起的 里程计输出与履带车辆实际行驶距离的误差进行补 偿,并实车验证了该组合导航方法的有效性。本文 的履带通信车行驶工况的分析基础及试验验证是在 路况较好的水泥地面上进行的,针对土路、山地、泥 路等复杂路况的分析更复杂,还需进一步分析和 研究。

参考文献:

- [1] 夏全喜.车载组合导航系统关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [2] 付强文,秦永元,李四海,等.车辆运动学约束辅助的惯性导航算法[J].中国惯性技术学报,2012,20(6): 640-643.

(上接第140页)

参考文献:

- BATHURST S P, KIM S G. Designing direct printing process for improved piezoelectric micro-devices [J].
 CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1): 193-196.
- [2] PARK E S. Application of Inkjet-Printing Technology to Micro-Electro-Mechanical Systems[D]. Berkeley: University of California, 2013.
- [3] BRÜNAHL J, GRISHIN A M. Piezoelectric shear mode drop-on-demand inkjet actuator [J]. Sensors &. Actuators A Physical, 2002, 101(3):371-382.
- [4] 许立宁,崔大付.剪式压电微喷的设计及分析[J].压电 与声光,2006,28(4):397-399.

XU Lining, CUI Dafu. Design and analysis of shear mode piezoelectric micro jet [J]. Piezoelectrics &. Acoustooptics, 2006,28(4):397-399.

- [5] TANUMA C, SHIMOSATO M, NITTA N, et al. Shear-mode industrial inkjet head using lead-free piezoelectric ceramics[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2012, 51(9):09LD13-09LD13-4.
- [6] 高勇.数字印刷设备喷头结构研究分析[D].北京:北 京印刷学院,2014.
- LI K,LIU J K,CHEN W S,et al. Controllable printing droplets on demand by piezoelectric inkjet: applications and methods[J]. Microsystem Technologies, 2018, 24 (2):879-889.

- [3] 付强文,秦永元,李四海.速度约束辅助车载捷联惯导 系统零速校正算法[J].系统工程与电子技术,2013,35 (8):1723-1728.
- [4] 王红岩,王钦龙,芮强.高速履带车辆转向过程分析与 试验验证[J].机械工程学报,2014,50(16):162-171.
- [5] 汤久望,刘维平,刘德刚,等.非精确转向情况下履带车 辆转向轨迹分析[J]. 兵工学报,2006,27(5):779-783.
- [6] 鲁连军.电传动履带车辆动力学与控制策略研究[D]. 北京:北京理工大学,2004.
- [7] 刘重发,赵涛,张涛,等.单流传动装置履带式车辆反转 向问题分析与处理[J].农机使用与维修,2016,22(6): 94-98.
- [8] 宋海军,高连华,李军,等.履带车辆转向性能指标修正 与实验[J].装甲兵工程学院学报,2008,22(6):65-68.

- [8] TAKEUCHI Y, NISHI S. Features of shear mode piezo inkjet head[J]. Denshi Shashin Gakkaishi, 2004, 43 (6):509-514.
- [9] 张智雄,郑学军,张勇,等.并联结构d₁₅模式 PZT-51 悬 臂梁的俘能性能[J].中国有色金属学报,2015,25(8): 2183-2189.
- [10] XU L, ZHANG Y, FAN H, et al. Theoretical analysis of a ceramic plate thickness-shear mode piezoelectric transformer [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics & Frequency Control, 2009, 56 (3): 613-621.
- [11] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版 社, 2006.
- [12] 许立宁. 基于 MEMS 技术的压电微喷的研制[D]. 北 京:中国科学院研究生院(电子学研究所),2005.
- [13] WIJSHOFF H. The dynamics of the piezo inkjet printhead operation [J]. Physics Reports, 2010, 491 (4): 77-177.
- [14] 李勇,孔春伟,何继爱,等.剪切型压电喷头驱动电源的 设计与实现[J].电子技术应用,2016,42(8):148-153.
- [15] WANG W,LI C,XU W, et al. Process for fabricating microactuator membranes of piezoelectric inkjet print head using multi-step deep reactive ion etching process [J]. Micro & Nano Letters, 2017, 12(7):482-485.
- [16] ZHAN H, XU F, NI Z. Fluid dynamic modeling and fuzzy proportional-integral-derivative-based ink-supply method for piezoelectric ink-jet printing[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(7):1-17.