doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.043

潜入牵引式自动导引车运动特性分析*

钱晓明　吴　斌　武　星　楼佩煌
(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

摘要:与驱动单元和车体刚性连接的传统结构及拖车结构不同,潜入牵引式自动导引车的驱动单元置于车体底部与车体柔性连接。针对车体的运动轨迹问题,建立了车体与所跟踪路径的位姿关系模型,根据车体的几何尺寸及所跟踪圆弧路径的圆心角和半径,推导出车体在世界坐标系中的位姿状态及保证纯滚动运动的最小转弯半径。针对车体负载运行的行驶性能问题,建立车体的动力学模型,求出忽略侧向力影响的条件,推导出车体的角加速度。车体位姿实验证明了所建车体运动学模型的正确性。动力特性实验表明,该种结构的自动导引车行驶稳定性较好。

关键词:自动导引车　驱动单元　潜入牵引　运动学　动力特性
中图分类号:TP24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2015)02-0294-07

Trajectory Properties of Automated Guided Vehicle with Sneak Traction

Qian Xiaoming　Wu Bin　Wu Xing　Lou Peihuang
(*College of Mechanical and Electric Engineering*, *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, *Nanjing* 210016, *China*)

Abstract: The drive unit and vehicle frame of traditional automated guided vehicle (AGV) and tractor-trailer were rigid coupling. Being different form the traditional machines, the drive unit and vehicle frame of AGV with sneak traction were flexible connection and the drive unit was used to drive the vehicle frame. To solve the problem of vehicle frame trajectory, a kinematic model was built to study the relationship between position posture of vehicle frame and the tracking path. According to geometric parameters of vehicle frame and central angle and radius of circular arc path, position posture of vehicle frame in world coordinate system was deduced. To solve the problem of AGV load driving, a dynamic model of AGV frame was built. The condition ignoring the effects of lateral force was calculated and the angular acceleration of the frame was deduced. Position posture tests proved that the kinematics model of AGV frame was correct. The results of dynamic property tests proved that the driving stability of AGV with this structure was excellent. The study results can provide the basis for improving the control performance of control system.

Key words: Automated guided vehicle　Drive unit　Sneak traction　Kinematics　Dynamic property

引言

自动导引车(Automated guided vehicle, AGV)作为一种搬运用移动机器人,在现代制造系统和自动仓储系统中大量用于自动化物流输送。驱动单元为 AGV 提供运行的牵引力,由直流伺服电动机、磁导引传感器、传动机构等组成。潜入牵引式 AGV,将驱动单元与车体柔性连接,降低了 AGV 机械结构及控制系统的复杂性,具有信息识别速度快、以较低的能耗驱动较大的载荷等特点,成为 AGV 发展的一个重要方向。

驱动单元通过前、后端的磁导引传感器获取局

收稿日期:2014-01-13　修回日期:2014-02-11
*国家自然科学基金资助项目(61105114)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2010189)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NS2014052)
作者简介:钱晓明,副教授,主要从事计算机集成制造和移动机器人技术研究,E-mail:drqian@nuaa.edu.cn

部区域中的导引信息，即驱动单元与导引磁条的位移和角度偏差，跟踪铺设的磁条路径行驶，因此基于全局运动学模型算法难以适用[1-2]。文献[3-6]研究的 AGV 均为驱动单元与承载单元刚性连接的传统模型，驱动轮也是承载轮，导致载荷较大时 AGV 路径跟踪控制难度增大。文献[7-8]所建模型为牵引车在拖车前端的传统牵引结构，拖车的运动轨迹难以精确控制。文献[9-11]针对自动引导车的动力学模型和运动约束进行研究，并将其运用到小车的导航控制过程中，但是轨迹跟踪的精确性难以保证。

潜入牵引式 AGV，把传统 AGV 结构与拖车结构相结合，将牵引驱动单元置于车体下部，驱动单元上部与车体刚性连接，下部跟踪铺设的磁条行驶。由于下部可绕车体转动，车体的运动轨迹较为复杂，因此本文首先针对潜入牵引式 AGV 车体位姿与所跟踪路径的几何关系问题，推导出车体在纯滚动状态下的最小转弯半径，确定车体在世界坐标系中的位姿状态，以精确控制车体姿态，保证 AGV 转向过程中车体能快速回正，进而建立该种结构 AGV 车体的动力学模型，研究负载工况下 AGV 的动力特性。

1　车体运动学模型

潜入牵引式 AGV 的运动学模型[13-15]如图 1 所示，其中圆弧路径的圆心角为直角，$\sum XOY$ 为固定于地面的世界坐标系，X 轴与圆弧路径起始点切线平行，Y 轴与圆弧路径终点切线平行，$\sum xoy$ 为随 AGV 车体运动的车载坐标系，原点为车体重心，x 轴为 AGV 车体左右侧的对称轴，$\sum x_1o_1y_1$ 为随驱动单元运动的坐标系，原点为驱动单元几何中心，x_1 轴为驱动单元左右侧的对称轴。

如图 1 所示，假设驱动轮及从动轮均为纯滚动，则驱动轮及从动轮转向的速度瞬心均为 o_2 点，根据几何关系有

$$R = b\cot\theta \tag{5}$$

$$\cot\delta_1 = \frac{R - \frac{M}{2}}{L} = \frac{b\cot\theta - \frac{M}{2}}{L} \tag{6}$$

$$\cot\delta_2 = \frac{R + \frac{M}{2}}{L} = \frac{b\cot\theta + \frac{M}{2}}{L} \tag{7}$$

由式(5)～(7)得

$$\cot\delta_2 - \cot\delta_1 = \frac{M}{L} \tag{8}$$

式中　R——o_1 点绕 o_2 点转弯的半径

b——驱动单元几何中心与两后轮中心在 x 轴上坐标差的绝对值

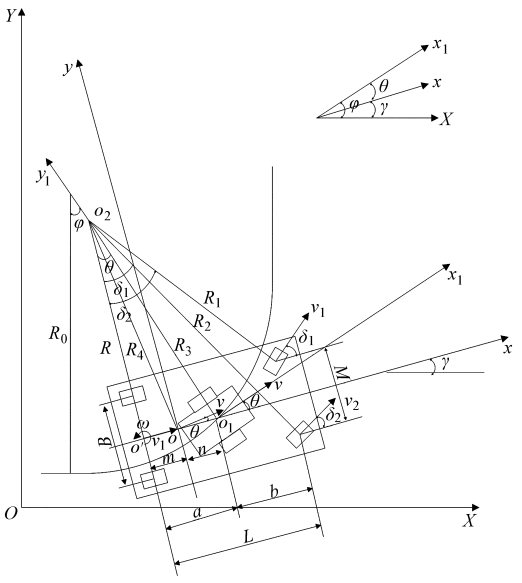

图 1　AGV 弯道运动学模型

Fig. 1　AGV steering kinematic model

θ——驱动单元与车体间夹角

δ_1——左前轮与车体夹角

δ_2——右前轮与车体夹角

L——车体前、后轮距

M——前轮轴距

如图 1 所示，根据速度及角度关系有

$$\begin{cases} v_1 = v\cos\theta = \omega R \\ \gamma = \omega t \\ \gamma + \theta = \varphi \end{cases} \tag{9}$$

式中　v_1——o_1 的速度

v——驱动单元几何中心的速度

ω——o_1 点绕 o_2 点转弯的角速度

γ——车体在 $\sum XOY$ 中的转角

t——驱动单元跟踪圆弧路径行驶时间

φ——驱动单元在 $\sum XOY$ 中的转角

由式(5)、(9)，有

$$\gamma + \arcsin\frac{b\gamma}{vt} = \varphi \tag{10}$$

图 2 为 AGV 从圆弧路径过渡到直线路径行驶的运动学模型，根据式(6)与式(7)所得的几何关系有

$$\cos\delta_3 = \frac{R}{L} = \frac{b\cot\theta}{L} \tag{11}$$

式中　δ_3——两前轮中点 D 速度方向与 x 轴的夹角

$$a\tan\theta - v_3\sin\delta_3\Delta t = a\tan(\theta - \Delta\theta) \tag{12}$$

式中　a——驱动单元几何中心与两前轮中心在 x 轴上坐标差的绝对值

v_3——两前轮中点 D 的速度

$\Delta\theta$——Δt 时间内 θ 的变化量

由于 Δt、$\Delta\theta$ 都很小，根据几何关系有

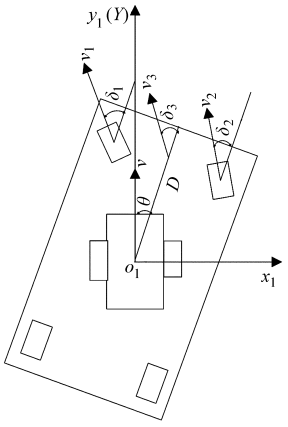

图 2 AGV 直线行驶运动学模型

Fig. 2 AGV rectilinear kinematic model

$$\Delta\theta = v\cos\theta\frac{\sqrt{L^2 - b^2\cot^2\theta}}{La}\Delta t \tag{13}$$

驱动单元跟踪直线路径行驶时,驱动单元与车体的初始夹角为 θ_0,则时间 $n\Delta t$ 后,驱动单元与车体的夹角 $\theta(n+1)$ 为

$$\theta(n+1) = \theta_0 - \sum_{i=0}^{n} v\cos\theta(i)\frac{\sqrt{L^2 - b^2\cot^2\theta(i)}}{La}\Delta t \tag{14}$$

由式(9)、(10),有

$$\sin\theta = \frac{b\gamma}{vt} \tag{15}$$

$$\begin{cases} vt = R_0\varphi \\ \gamma = \varphi - \theta \end{cases} \tag{16}$$

式中 R_0——圆弧路径半径

根据式(15)、(16)有

$$R_0 = \frac{b(\varphi - \theta)}{\varphi\sin\theta} \tag{17}$$

2 车体动力特性分析

在 AGV 智能控制研究中,建立的 AGV 模型大多是简化后的运动学模型。由于 AGV 是一个较为复杂的机电一体化产品,仅仅依靠运动模型往往难以达到对 AGV 理想控制的目的。因此,建立 AGV 车体的动力学模型是必要的。

2.1 车轮受力分析

AGV 行驶的驱动力由车轮与地面间的摩擦力提供。如图 3 所示,对驱动轮在硬路面上等速滚动时进行受力分析。

图中 P_1为驱动轮承受的压力,T_1为作用于驱动轮的转矩,F_1'为驱动轮所受的阻力,F_{N1}为地面对驱动轮的支持力,F_{x1}为作用于驱动轮上驱动 AGV 行驶的地面切向反作用力,r 为驱动轮的半径。滚动阻力与驱动力无法在受力图上画出。由于驱动轮滚动阻力较小,可忽略滚动阻力的影响。

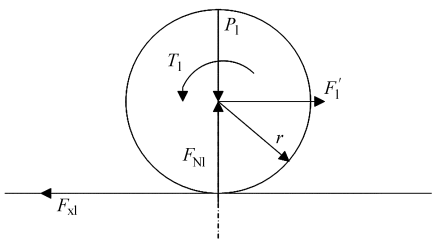

图 3 驱动轮受力分析图

Fig. 3 Stress analysis of driving wheel

根据图 3,忽略滚动阻力的影响,由平衡条件得

$$F_{x1}r = T_1 \tag{18}$$

2.2 驱动单元受力分析

如图 4 所示,对驱动单元在等速运行时进行受力分析:

x_1轴 $$F_{x1} + F_{xr} = F \tag{19}$$

式中 F_{x1}——地面对左轮的切向反作用力

F_{xr}——地面对右轮的切向反作用力

F——车体对驱动单元的作用力

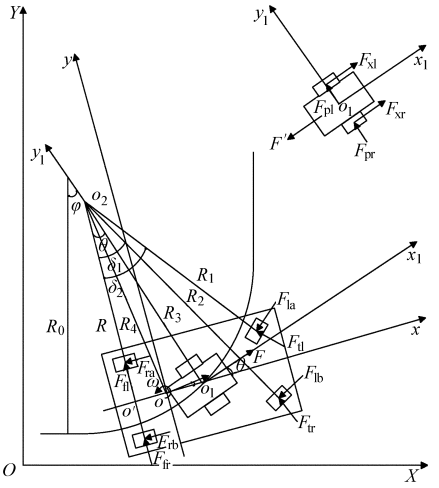

图 4 AGV 动力学模型

Fig. 4 Dynamic model of AGV

2.3 车体动力分析

如图 1、图 4 所示,对 AGV 车体进行受力分析:

x 轴 $$F\cos\theta - F_{la}\cos\delta_1 - F_{ra}\cos\delta_2 - F_{tl}\sin\delta_1 - F_{tr}\sin\delta_2 - F_{lb} - F_{rb} = m_c a_x \tag{20}$$

式中 F_{la}——左前轮受的滚动摩擦力

F_{ra}——右前轮受的滚动摩擦力

F_{tl}——左前轮受的侧向摩擦力

F_{tr}——右前轮受的侧向摩擦力

F_{lb}——左后轮受的滚动摩擦力

F_{rb}——右后轮受的滚动摩擦力

m_c——车体质量

a_x——车体在 x 轴方向的加速度

y 轴 $$F\sin\theta - F_{la}\sin\delta_1 - F_{ra}\sin\delta_2 + F_{tl}\cos\delta_1 + F_{tr}\cos\delta_2 + F_{fl} + F_{fr} = m_c a_y \tag{21}$$

式中　F_{fl}——左后轮受的侧向摩擦力

F_{fr}——右后轮受的侧向摩擦力

a_y——车体在 y 轴方向的加速度

z 轴　$F\sin\theta n - F_{fl}m - F_{fr}m + F_{lb}\frac{B}{2} - F_{rb}\frac{B}{2} -$

$$F_{la}\cos\delta_1\frac{M}{2} + F_{la}\sin\delta_1(l-m) + F_{tl}\cos\delta_1(l-m) +$$

$$F_{tl}\sin\delta_1\frac{M}{2} + F_{ra}\cos\delta_2\frac{M}{2} + F_{ra}\sin\delta_2(l-m) +$$

$$F_{tr}\cos\delta_2(l-m) - F_{tr}\sin\delta_2\frac{M}{2} = I_z\ddot{\beta} \qquad (22)$$

式中　m——车体重心与两定向轮中点沿 x 轴方向的距离

n——车体重心与驱动单元中心沿 x 轴方向的距离

I_z——车体负载后的转动惯量

$\ddot{\beta}$——车体的角加速度

3　运动仿真及实验验证

实验 AGV 如图5所示，其参数为：L = 1 140 mm，b = 595 mm，M = 386 mm，B = 406 mm。

为验证式(6)、(7)的正确性，分别在驱动单元、左前轮及右前轮安装角度传感器，由于 AGV 以较低速度行驶有利于角度传感器采集更为精确的信号，因此设定图 5 中 AGV 行驶速度为 0.1 m/s。以图示位置为起点，测得 AGV 跟踪图 5 所示路径运动一周时 θ 随时间变化的曲线如图 6a 所示，δ_1 随时间变化的曲线如图 6b 中实线所示，δ_2 随时间变化的曲线如图 6c 中实线所示。根据图 6a 及式(6)、式(7)，得到 δ_1、δ_2 随时间变化的曲线如图 6b、图 6c 所示，2 条曲线基本重合，图 6b 中根据 θ 推出的 δ_1 值略大于实验值，说明由于弯道半径过小，左前轮转动不再是纯滚动。实验结果证明本文所建的 AGV 车体转向模型正确。

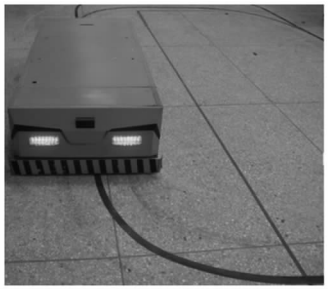

图 5　AGV 路径跟踪实验

Fig. 5　AGV path tracking test

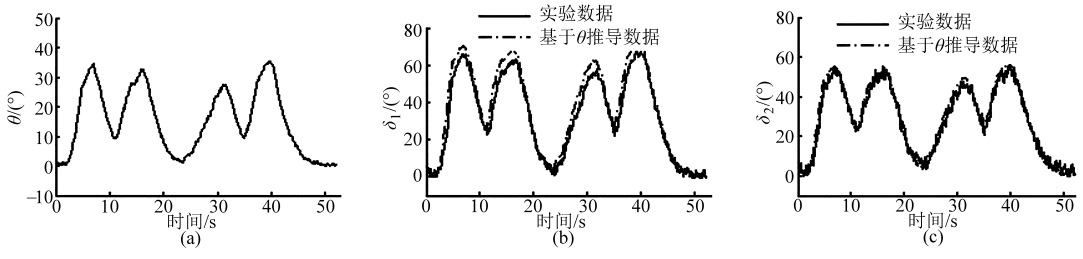

图 6　θ、δ_1 及 δ_2 随时间变化

Fig. 6　θ, δ_1 and δ_2 changing with time

为验证式(14)的正确性，AGV 以 0.1 m/s 的速度跟踪一段半径为 1 m，圆心角为 70°的圆弧路径后再跟踪直线路径，路径如图 7 所示。测得 θ 随时间变化曲线如图 8 中实线所示，根据式(14)计算得的理论值随时间变化曲线如图 8 中点画线所示。实验结果表明，本文所建的 AGV 车体回正模型正确。

车体转向与回正实验验证了本文所建的 AGV 运动学模型的正确性。

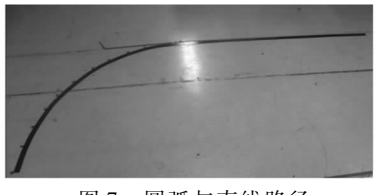

图 7　圆弧与直线路径

Fig. 7　Circular and linear path

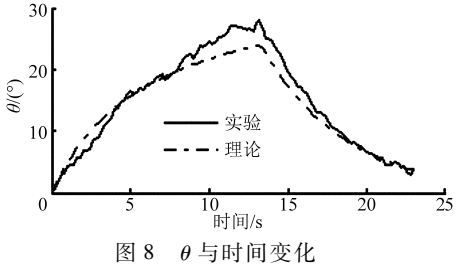

图 8　θ 与时间变化

Fig. 8　θ changing with time

4　动力特性分析

利用开发的 AGV 进行动力特性试验。AGV 行驶的路径如图 9 所示，跟踪弯道路径行驶均为向左转向，载荷为 110 kg 且呈左右对称分布，速度设置为 0.5 m/s。

AGV 以 0.5 m/s 的速度行驶时，左前轮、右前轮、左后轮及右后轮承担载荷随时间变化曲线分别如图 10 所示。

由图 10 可知，左前轮承担的载荷大于右前轮，

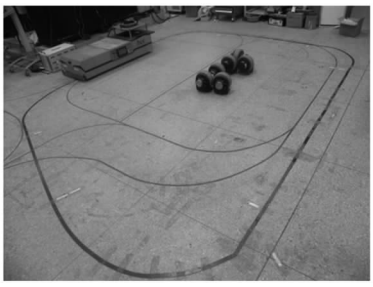

图 9 AGV 动力特性实验

Fig. 9 Dynamic case test of AGV

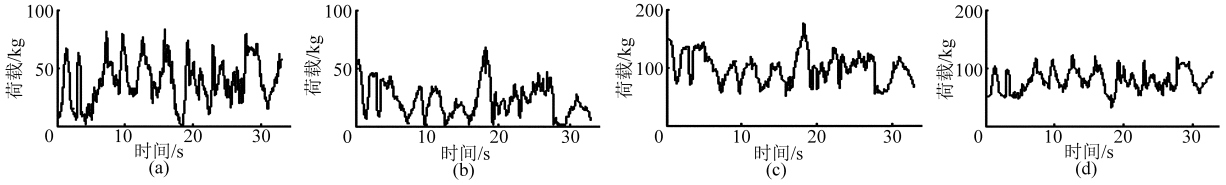

图 10 承载轮载荷随时间的变化曲线

Fig. 10 Load of bearing wheels changing with time

(a) 左前轮 (b) 右前轮 (c) 左后轮 (d) 右后轮

左后轮承担的载荷大于右后轮,即当 AGV 转向行驶且车体没有回正时,即使载荷呈左右对称分配,内侧车轮承担的载荷也大于外侧车轮。

对比图 10,当左侧承载轮承担载荷曲线处于上升沿时,右侧承载轮承担载荷曲线处于下降沿,左侧承载轮承担载荷曲线处于下降沿时,右侧承载轮承担载荷曲线处于上升沿,即内侧承载轮与外侧承载轮承担载荷的变化趋势相反。

对比图 10,当前端承载轮承担载荷曲线处于上升沿时,后端承载轮承担载荷曲线处于下降沿,前端承载轮承担载荷曲线处于下降沿时,后端承载轮承担载荷曲线处于上升沿,即前端承载轮与后端承载轮承担载荷的变化趋势相反。

图 10a 表明,当 AGV 进入弯道路径行驶时,左前轮承担的载荷增大,由弯道路径过渡到直线路径行驶时,左前轮承担的载荷减小,即 δ_1 增大时,左前轮承担的载荷也增大,δ_1 减小时,左前轮承担的载荷也减小。图 10b 表明,右前轮承担载荷的特性与左前轮相反,即 δ_2 增大时,右前轮承担的载荷减小,δ_2 减小时,右前轮承担的载荷增大。

AGV 前端两承载轮承担的总载荷随时间变化的曲线如图 11a 所示, AGV 后端两承载轮承担的总载荷随时间变化的曲线如图 11b 所示。

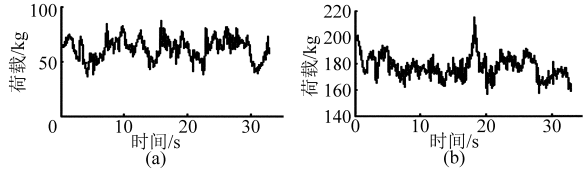

图 11 承载轮载荷随时间的变化曲线

Fig. 11 Load of bearing wheels changing with time

(a) 前轮 (b) 后轮

驱动单元左轮转矩随时间变化曲线见图 12a,右轮转矩随时间变化曲线见图 12b。根据电机的转矩及式(18)、(19),得总驱动力随时间变化曲线如图 13 所示。

综合以上分析结果,在路面平整的工况下,承载轮承担载荷具有表 2 所示的特性。

AGV 负载后的转动惯量为 80 kg·m^2,选取滚动阻力系数为 0.006,侧向滑动摩擦系数为 0.08,m = 0.45 m,n = 0.085 m,假设 AGV 的承载轮具有侧向滑动,即受到侧向力,根据各承载轮载荷及驱动轮转矩,结合式(20)~(22),得该工况下 AGV 的角加速度随时间变化曲线如图 14a 所示。由图 14a 可知,在该假设条件下,AGV 的角加速度很大,与实验结果矛盾,因此该假设不成立。若忽略承载轮受到侧

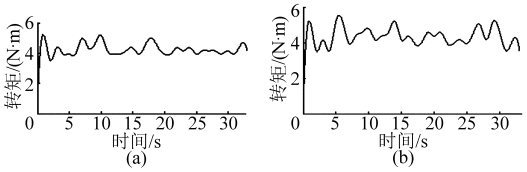

图 12 驱动轮转矩随时间的变化曲线

Fig. 12 Torque of driving wheels changing with time

(a) 左轮 (b) 右轮

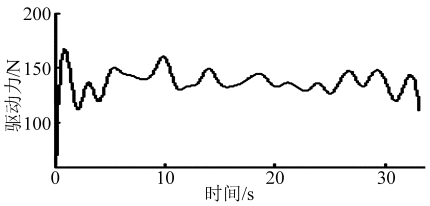

图 13 总驱动力随时间的变化曲线

Fig. 13 Total driving force changing with time

表 2 承载轮承担载荷特性

Tab. 2 Load case of bearing wheels

承载轮载荷	万向轮转动切角变化	
	增大	减小
内侧万向轮	增大	减小
外侧万向轮	减小	增大
内侧定向轮	增大	减小
外侧定向轮	减小	增大
前轮总载荷	增大	减小
后轮总载荷	减小	增大

向力的影响，得 AGV 在该工况下的角加速度随时间变化曲线如图 14b 所示，由图 14b 可知，AGV 跟踪图 9 所示路径行驶时，车体角加速度不超过 0.17 rad/s^2，当车体回正后，AGV 车体的角加速度基本为 0，与实验结果吻合。

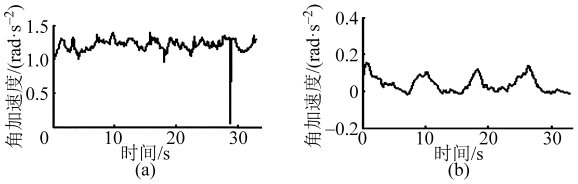

图 14　车体角加速度随时间的变化曲线

Fig. 14　Angular acceleration of AGV frame changing with time

（a）考虑侧向力　（b）忽略侧向力

因此，AGV 在负载为 110 kg、速度为 0.5 m/s 的工况下运行应忽略侧向力的影响，可看作纯滚动行驶，且车体的角加速度不超过 0.17 rad/s^2，车体运行平稳，稳定性较好。

AGV 的动力特性实验说明了所建运动学、动力学模型的正确性。

AGV 动力特性实验中，测得左前轮与 AGV 车体夹角 δ_1 随时间变化曲线如图 15 中蓝色曲线所示，根据驱动单元与车体夹角 θ 与式(6)得到的 δ_1 随时间变化曲线如图 15 中红色曲线所示。根据图 15 可知，当左前轮与车体夹角 δ_1 小于 60°时，AGV 转向可看作纯滚动行驶，可以忽略侧向力的影响。

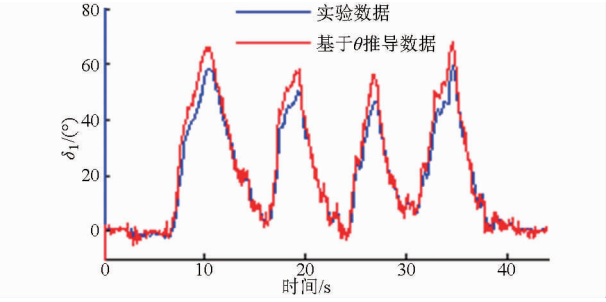

图 15　δ_1 随时间变化

Fig. 15　δ_1 changing with time

AGV 转向行驶时，假设 AGV 跟踪的圆弧路径的圆心角不超过 90°，即 $\varphi_{\max}=90°$，由式(6)、(17)得 $R_0=635$ mm，即本文开发的潜入牵引式 AGV 能保证纯滚动行驶所跟踪的圆弧路径的最小半径为 $R_{0\min}=635$ mm，当圆弧路径的半径大于或等于 635 mm 时，可忽略侧向力对 AGV 的影响。此时，车体的角加速度为

$$\ddot{\beta}=\left\{\frac{T_1+T_r}{r}n\sin\theta+(F_{lb}-F_{rb})\frac{B}{2}+F_{la}\left[\sin\delta_1(l-m)-\cos\delta_1\frac{M}{2}\right]+F_{ra}\left[\cos\delta_2\frac{M}{2}+\sin\delta_2(l-m)\right]\right\}\Big/I_z$$

5　结论

研究了一种驱动单元和车体柔性连接的潜入牵引式 AGV。针对车体的运动轨迹问题，建立了车体与所跟踪路径的位姿关系模型，并根据车体的几何尺寸及所跟踪圆弧路径的圆心角和半径，推导出车体在世界坐标系中的位姿状态，根据纯滚动行驶条件确定圆弧路径的最小半径；针对车体运行的稳定性问题，建立了车体动力学模型，计算出 AGV 转弯时车体的角加速度，进而确定可忽略侧向力的条件，为提高控制系统的控制能力提供依据。

（1）对潜入牵引式 AGV 进行了圆弧路径及直线路径行驶的运动学建模，车体位姿实验证明了该模型的正确性。

（2）潜入牵引式 AGV 不能够转直角弯，对圆弧路径的最小半径也有要求。

（3）潜入牵引式 AGV 左前轮与车体夹角小于 60°时，AGV 可看作纯滚动行驶，可忽略侧向力的影响，AGV 运行稳定性较好。

参　考　文　献

1　Jiang Zhongping , Nijmeijer Henk. Tracking control of mobile robots: a case study in backstepping[J]. Automatic, 1997, 33(7): 1393 – 1399.

2　Wang Taiyu, Tsai Chingchih. Adaptive trajectory tracking control of a wheeled mobile robot via lyapunov techniques[C]// Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Busan, 2004, 1: 389 – 394.

3　武星，楼佩煌. 基于运动预测的路径跟踪最优控制研究[J]. 控制与决策, 2009, 24(4): 565 – 569.
Wu Xing, Lou Peihuang. Optimal path tracking control based on motion prediction[J]. Control and Decision, 2009, 24(4): 565 – 569. (in Chinese)

4　武星，楼佩煌，唐敦兵. 自动导引车路径跟踪和伺服控制的混合运动控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(3): 43 – 48.
Wu Xing, Lou Peihuang, Tang Dunbing. Integrated motion control of path tracking and servo control for an automated guided vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(3): 43 – 48. (in Chinese)

5　史恩秀，黄玉美，郭俊杰，等. 自主导航小车(AGV)轨迹跟踪的模糊预测控制[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(5): 592 – 596.
Shi Enxiu, Huang Yumei, Guo Junjie, et al. Fuzzy predictive control for trajectory tracking of a wheeled mobile robot[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(5): 592 – 596. (in Chinese)

6 朱从民,黄玉美,马斌良,等. 惯性导航自动引导车磁钉校正路径迭代学习方法[J]. 农业机械学报,2009,40(7):40 - 44.
Zhu Congmin, Huang Yumei, Ma Binliang, et al. Path iterative learing of inertial guided AGV with magnets correction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(7): 40 - 44. (in Chinese)
7 Yang Bin, Taehyun Shim. Constrained model predictive control for backing-up tractor-trailer system[C]// Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2012: 2165 - 2170.
8 Jaeil Roh, Hyunsuk Lee, Woojin Chung. Control of a car with a trailer using a driver assistance system[C]// Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2011: 2890 - 2895.
9 陈无畏,施文武,王启瑞,等. 基于动力学模型的自动导引车智能导航控制研究[J]. 农业机械学报,2003,34(4):90 - 93.
Chen Wuwei, Shi Wenwu, Wang Qirui, et al. Intelligent navigation and control method based on dynamic model of an automatic guided vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(4):90 - 93. (in Chinese)
10 Shi Enxiu, Guo Junjie. Simulation and kinematics analysis of composite turning for the omni-direction AGV[C]// Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2008: 2770 - 2775.
11 赵磊,王鸿鹏,董良,等. 一种基于动力学模型的高速轮式移动机器人漂移运动控制方法[J]. 机器人,2014,36(2):137 - 146.
12 宋永端,李丹勇,蔡文川. 移动机器人及其自主化技术[M]. 北京:机械工业出版社,2012:252 - 254.
13 Abdullah A S, Hai L K, Osman N A, et al. Vision based automatic steering control using a PID controller[J]. Jurnal Teknologi, 2006,44(A):97 - 114.
14 王良曦,王红岩. 车辆动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2008:87 - 104.
15 Wang Chaoli. Semiglobal practical stabilization of nonholonomic wheeled mobile robots with saturated inputs[J]. Automatica, 2008, 28(3):816 - 822.
16 Chang W J, Huang W H, Chang W, et al. Robust fuzzy control for continuous perturbed time-delay affine takagi-sugeno fuzzy models[J]. Asian Journal of Control,2011,13(6):818 - 830.
17 廖华丽,周祥,董丰,等. 基于模糊控制的 AGV 寻迹算法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(7):896 - 898.
Liao Huali, Zhou Xiang, Dong Feng, et al. AGV navigation alogorithm based on fuzzy control[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005,37(7):896 - 898. (in Chinese)
18 Doudou S, Khaber F. Direct adaptive fuzzy control of a class MIMO non-affine nonlinear systems[J]. International Journal of Systems Science, 2012,43(6):1029 - 1038.
19 Dax T, Kar I N. Design and implementation of an adaptive fuzzy logic-based controller for wheeled mobile robots[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(3):501 - 510.
20 陈平,倪振,马伟. 四轮差动全方位移动机器人路径跟随控制分析[J]. 重庆大学学报,2013,36(3):20 - 24.
Chen Ping, Ni Zhen, Ma Wei. The path following control analysis for 4-wheel differential omnidirectional mobile robot[J]. Journal of Chongqing University, 2013,36(3):20 - 24. (in Chinese)

(上接第 280 页)

18 Hirtum A V, Berckmans D. Considering the influence of artificial environmental noise to study cough time-frequency features[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 266(3): 667 - 675.
19 曹晏飞,滕光辉,余礼根,等. 含风机噪声的蛋鸡声音信号去噪方法比较[J]. 农业工程学报,2014,30(2):212 - 218.
Cao Yanfei, Teng Guanghui, Yu Ligen, et al. Comparison of different de-noising methods in vocalization environment of laying hens including fan noise[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 212 - 218. (in Chinese)
20 韦力,邵伟伟,林植华. 饰纹姬蛙求偶鸣声特征分析[J]. 动物学研究,2013,34(1):14 - 20.
Wei Li, Shao Weiwei, Lin Zhihua. Characteristics of courtship calls of *Microhyla ornata* (Anura: Microhylidae)[J]. Zoological Research, 2013,34(1): 14 - 20. (in Chinese)
21 Berckmans D. Basic principles of PLF: gold standard, labeling and field data[C]// The 6th European Conference on Precision Livestock Farming, 2013.
22 Lagarde`re J P, Mallekh R. Feeding sounds of turbot (*Scophthalmus maximus*) and their potential use in the control of food supply in aquaculture: I. Spectrum analysis of the feeding sounds[J]. Aquaculture, 2000, 189(3 - 4): 251 - 258.
23 Mallekh R, Lagarde`re J P, Eneau J P, et al. An acoustic detector of turbot feeding activity[J]. Aquaculture, 2003, 221(1 - 4): 481 - 489.
24 Exadaktylos V, Silva M, Aerts J M, et al. Real-time recognition of sick pig cough sounds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 207 - 214.
25 赵力. 语音信号处理[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2009:32 - 45.
26 杜燕. 新型栖架系统中饲养密度及产蛋箱配置对蛋鸡生产的影响[D]. 北京:中国农业大学,2012.
Du Yan. Influence of different stocking density and laying nest boxes configuration on performance of new perch housing[D]. Beijing: China Agricultural University, 2012. (in Chinese)