

一种小型轮式平台的设计与运动仿真

张 骞, 李年裕, 杨怀彬

(装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072)

摘要: 针对传统轮式车辆转向半径大, 转向阻力大的问题, 提出一种新型的轮式车辆平台方案。该平台的运动机构由定轴转动的前轮和万向轮后轮组成, 主动轮是由轮毂电机独立驱动的前轮, 后轮为从动轮; 平台采用电驱动, 包含电源系统, 控制系统, 车体等几大部分, 相比于传统的车辆, 该平台引进了万向轮, 大大加强了平台的灵活性, 转向更加方便; 通过在 Solid Works 中建立模型, 然后在 RecurDyn 中进行仿真, 设置不同的实验条件, 根据实验结果可以得到: 当后轮为万向轮时, 平台相对于后轮固定具有较好的转弯能力, 横摆角速度减小, 平台转弯更加平稳; 同时, 平台具有一定的越障能力, 可以在一定的复杂地形上完成运动, 能够跨越一定尺寸的壕沟。这一结果可以为科学研究和实际应用提供理论依据。

关键词: 万向轮; RecurDyn; 建模与仿真

Design and Motion Simulation of a Small Wheeled Platform

Zhang Qian, Li Nianyu, Yang Huaibin

(Department of Control Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Aiming at the problem of large turning radius and large steering resistance of traditional wheeled vehicles, a new type of wheeled vehicle platform is proposed. The platform consists of a front wheel and a caster wheel, which are fixed by a fixed shaft. The driving wheel is a front wheel independently driven by a wheel motor and the rear wheel is a driven wheel. The platform uses electric drive, including power supply system, control system, body and so on several major parts. Compared to the traditional vehicles, the platform introduced a caster, greatly enhancing the flexibility of the platform, steering more convenient. By modeling in the Solid Works software and simulating in the RecurDyn software, According to the experimental results, we can get: When the rear wheel is a caster, the platform has better turning ability relative to the rear wheel fixing, the yaw rate decreases and the platform turns more smoothly. At the same time, the platform has a certain barrier capability, can be completed in a certain complex terrain movement, to a certain size of the trenches. This result can provide theoretical basis for scientific research and practical application.

Keywords: caster; RecurDyn; modeling and simulation

0 引言

现在小型平台在日常生活中越来越多的被使用到, 这些平台往往具有一定的运载能力, 但是多数平台还存在着一些问题, 比如: 有的转弯不灵活, 很难在狭小地带使用; 有的越野能力弱, 不能在不平路面上使用; 有的结构复杂, 成本居高不下。本文设计了一种小型的轮式平台, 结构简单, 有一定的越野能力, 同时转向能力较好。

虚拟样机技术是以机械系统运动学、动力学和控制等建模理论及其技术实现为核心, 同时还包括三维 CAD 建模技术、有限元分析技术以及最优化技术的一门综合多学科的技术。采用虚拟样机技术可以减少重大设计失误, 避免重复建立物理样机, 从而节省时间降低成本。采用虚拟样机仿真分析已经成为重要的设计方式。

1 平台的运动学分析

平台在运动过程中, 以它的质心作为标志点, 平台的位置、速度以质心的位移、速度来代表^[1]。因此分析平台的速度主要是分析质心的速度, 具体分析如下:

平台的位移:

收稿日期: 2017-01-05; 修回日期: 2017-02-20。

作者简介: 张 骞 (1992-), 男, 陕西商洛人, 硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方向的研究。

$$s = \int_{t_1}^{t_2} \omega dt \quad (1)$$

平台转弯时的速度分析如图 1 所示。

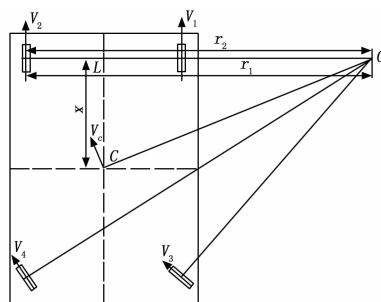


图 1 平台转弯速度

平台转弯时两前轮通过差速使得平台方向发生变化^[2]。图 1 是平台右转弯时的速度分析, O 为转弯时速度瞬心, 两前轮间距为 L , 右前轮转弯半径为 r_1 , 左前轮转弯半径为 r_2 , 前轮轴线与质心距离为 X , 右前轮的速度为 v_1 , 左前轮的速度为 v_2 , 右后轮的速度为 v_3 , 左后轮的速度为 v_4 , 质心的速度为 v_c 。

由运动学理论有:

$$\frac{v_1}{r_1} = \frac{v_2}{r_2} = \omega_r \quad (2)$$

$$v_c = \omega_r \cdot r_c = \omega_r \cdot \sqrt{X^2 + \left(r_1 + \frac{L}{2}\right)^2} \quad (3)$$

$$r_2 = L + r_1 \quad (4)$$

式中, ω_r 为横摆角速度, 可以反应平台转弯的稳定性。当横摆角速度越小, 平台转弯越稳定, 当横摆角速度超过一个阈值时, 平台转弯不稳定, 会出现打滑。

设地面的摩擦系数为 f_s , 则平台转弯的稳定条件为:

$$mgf_s \geq mr_c \omega_r^2 \quad (5)$$

$$r_c = \sqrt{X^2 + (r_1 + \frac{L}{2})^2} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (5) 得到横摆角速度的阈值为:

$$\omega_{m} = \sqrt{\frac{gf_s}{r_c}} \quad (7)$$

将式 (2) ~ (7) 整理后有:

$$gf_s \geq \frac{(v_2 - v_1)^2}{L^2} \sqrt{X^2 + (\frac{Lv_1}{v_2 - v_1} + \frac{L}{2})^2} \quad (8)$$

只有两主动轮的速度满足该关系时, 平台才不会出现打滑。

2 平台的设计与建模

以单人代步车为依据设计该轮式车辆。根据人体尺寸, 设置平台的长为 300 mm, 宽为 260 mm, 前轮直径为 $D=100$ mm, 后轮直径为 $d=50$ mm。在保证平台的稳定性的基础上同时考虑平台的通过性, 把平台的底盘距地面的距离设定为 75 mm 左右, 安装完控制器、电源等最低处距离地面距离不得低于 20 mm。两前轮间距 $L=350$ mm, 前轮轴线与质心距离 $X=56$ mm 左右。建模在 SolidWorks 中进行。按照所设计的尺寸建立相应的模型, 建模过程中省去一些对仿真结果没有意义的特征, 比如圆角、倒角、轮胎花纹。这样既能满足仿真要求, 又能减少仿真时间, 缩短仿真周期。

最后整车的装配体如图 2 所示。

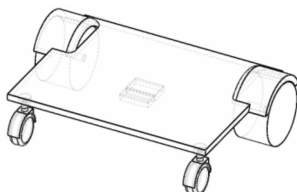


图 2 平台整体

在建模的过程中, 为了使仿真尽量简化, 省去一些没有必要的特征, 比如轮胎花纹、一些螺纹等。这样的简化不会影响仿真的主要性能, 但是对质量会有些许影响, 这些影响基本可以忽略。

3 平台的仿真实验

3.1 仿真前的准备

首先将在 Solid Works 中建立的三维模型保存为 .x_t 格式^[3], 然后将文件导入到 RecurDyn 中, 然后在 RecurDyn 中添加约束, 建立路面^[4]。

添加摩擦系数, 将轮子与地面的摩擦系数设定为 0.5, 最大静摩擦系数定为 0.55。忽略轮子与转动轴之间的摩擦^[5]。

添加弹簧力, 为了适应各种路面, 平台必须具有减震效果, 为了模拟这一特征, 在万向轮竖直轴上加上弹簧。

3.2 仿真实验

3.2.1 平台在平坦地面上的直行

在前轮的两个转动副上加上驱动力来模拟轮毂电机。为了

消除车辆与地面初始位置的影响, 将速度设定为一个 step 函数, 具体为 step (time, 0.5, 0, 3, 80), 即轮子的角速度从 0.5 s 开始加速, 到 3 s 时加速到 80 rad/s。左右两主动轮的速度均设为该值, 然后开始仿真^[6-8]。

将仿真时间定为 5 s, 仿真步数根据具体情况设定。步数过多会使仿真时间变长, 过少会使仿真结果误差较大, 本文在保证仿真结果精确的基础上尽量减少步数, 大约为 1 000 左右, 视具体调节。最终仿真结果如图 3 所示。图 3 (a) 为位移, 图 3 (b) 为速度, 由图可以看出: 车辆从 0.5 s 开始加速, 到 3 s 时结束, 这与我们设定的参数相一致。主动轮半径为 50 mm, 因此线速度应该是 $50 \text{ mm} \times 80 \text{ rad/s} = 4\,000 \text{ mm/s}$, 可以看出理论计算与仿真结果相一致。

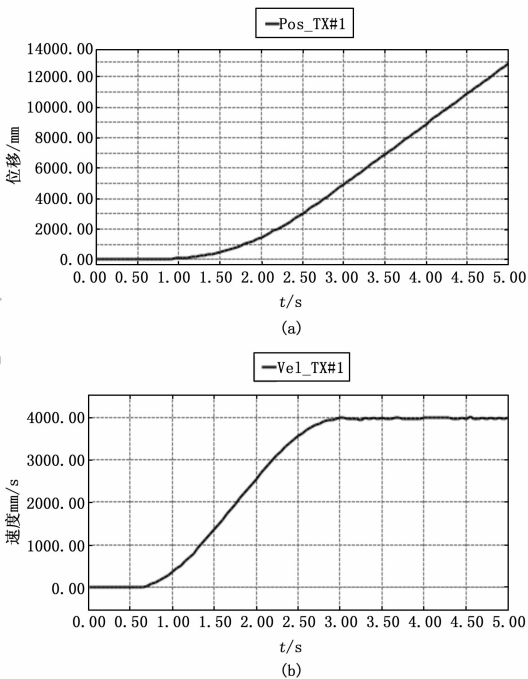


图 3 直行仿真结果

3.2.2 平台的转弯

该平台采用差速转向, 通过控制两个主动轮的速度, 使得平台完成转向, 在直行的基础上, 改变两主动轮的速度, 使得两轮速度不一样: 左主动轮速度设为 step (time, 0.5, 0, 3, 40), 右主动速度轮设为 step (time, 0.5, 0, 3, 20), 仿真结果如图 4 所示。

图 4 (a) 是转弯时平台质心的轨迹图, 图 4 (b) 是质心的速度, 由图 4 (b) 可以看出, 平台从 0.5 秒开始加速, 到三秒时加速到 1 500 mm/s 左右, 而后平台以固定速度开始做圆周运动。

平台转弯时质心速度由式 (2) ~ (7) 可以算出。将 $L=350$ mm, $X=55$ mm, $v_1=1\,000$ mm/s, $v_2=2\,000$ mm/s 分别带入得到:

$$r_1 = L = 350 \text{ mm}, r_2 = 2L = 700 \text{ mm};$$

$$\omega_r = \frac{v_1}{r_1} = \frac{v_2}{r_2} = \frac{20}{7} \text{ rad/s};$$

$$r_c = \sqrt{X^2 + (r_1 + \frac{L}{2})^2} \approx 528 \text{ mm};$$

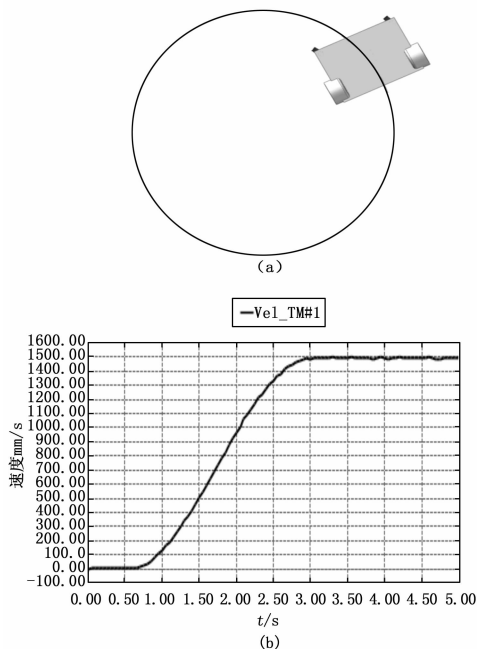


图 4 右转弯仿真结果

$$v_c = \omega_r \cdot r_c = 1\ 508\ \text{mm/s}.$$

仿真结果与理论计算基本一致。

此时, 平台的横摆角速度阈值为: $\omega_{rm} = 3.20\ \text{rad/s}$, 因此 $\omega_r < \omega_{rm}$, 因此平台不会发生滑移, 由图 4 (a) 可以看出确实没有滑移, 轨迹为完整圆弧。

将左轮的速度设为 $\text{step}(\text{time}, 0.5, 0, 3, 80)$, 右轮设为 $\text{step}(\text{time}, 0.5, 0, 3, 20)$, 仿真结果如图 5 所示。

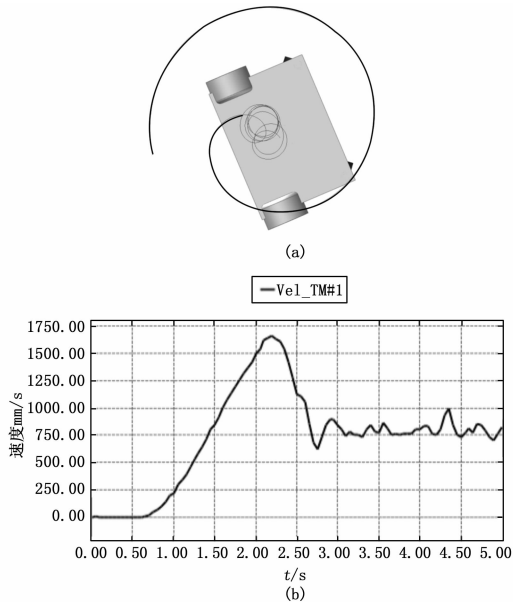


图 5 右转出滑移

由图 5 (a) 可以发现, 平台出现了明显的滑移, 轨迹曲线不再是完整的圆弧。将 $v_1 = 1\ 000\ \text{mm/s}$, $v_2 = 4\ 000\ \text{mm/s}$ 代入式 (2) ~ (7), 得到:

$$\omega_r = 8.57\ \text{rad/s}, r_c = 296.8\ \text{mm}, \omega_{rm} = 4.26\ \text{rad/s}.$$

显然 $\omega_r > \omega_{rm}$, 因此平台会出现打滑, 理论计算与仿真一

致。在 3 秒以后平台的速度在 750 mm/s 左右跳动, 此时 $\omega'_r = \frac{v_c}{r_c} = 2.50\ \text{rad/s}$, 随着速度的波动, 平台介于滑移与稳定之间, 因此轨迹线呈现出局部圆弧的特点。

3.2.3 平台的中心转向

将平台的左轮速度设为 $\text{step}(\text{time}, 0.5, 0, 3, 20)$, 右轮速度设定为 $\text{step}(\text{time}, 0.5, 0, 3, -20)$ 。仿真结果如图 6 所示。这时可以发现平台的质心也有速度, 这是因为平台的质心与转动中心不重合, 因此质心会绕着转动中心做圆周运动, 会有一个圆周速度。

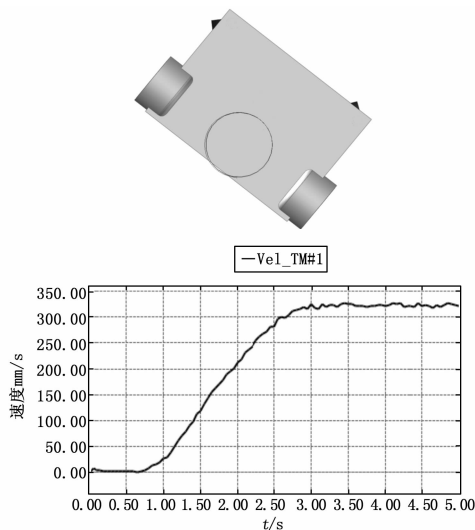


图 6 中心转向仿真结果

中心转向时两主动轮绕连线中点作圆周运动, 所以 $r_1 = r_2 = \frac{L}{2} = 175\ \text{mm}$, $X = 55\ \text{mm}$, $v_1 = v_2 = 1\ 000\ \text{mm/s}$, 代入公式得到:

$$\omega_r = 5.71\ \text{rad/s}, r_c = 56\ \text{mm}, v_c = \omega_r \cdot r_c = 320\ \text{mm/s}.$$

由图 6 可以看出, 速度在 3 秒后基本稳定在 320 mm/s 左右, 这与理论计算相吻合。

此时的 $\omega_{rm} = 9.81\ \text{rad/s}$, 因此 $\omega_r < \omega_{rm}$, 平台转弯过程中不会发生滑移, 轨迹图为一个完整的圆周。

3.2.4 平台的越坑

在路面设立一个宽度为 50 mm 的沟, 平台的仿真结果如图 7 所示。由图可以看出平台在 0.31 s 左右前轮开始越坑, 大约 0.1 s 后前轮出坑, 0.59 s 左右后轮开始进坑, 0.65 s 左右后轮出坑^[9-10]。

该仿真表明平台具有一定的跨越障碍的能力。

4 结论

通过仿真实验可以发现, 这种轮式平台可以在坚实路面上完成直行、转弯、中心转向等动作, 并且能够跨越一定尺寸的壕沟, 具有一定的越障能力。

平台在转弯时转弯半径与两主动轮的速度有关, 而且只有两主动轮的速度满足一定的关系, 即 $gf_s \geq \frac{(v_2 - v_1)^2}{L^2}$

$$\sqrt{X^2 + \left(\frac{Lv_1}{v_2 - v_1} + \frac{L}{2}\right)^2}$$

时, 平台才不会出现打滑。

放置 50 只蚂蚁进行 50 次迭代的 T-ACA。

表 3 两种算法性能比较

栅格数	最优路径		寻优时间	
	T-ACA	LD-ACA	T-ACA	LD-ACA
10	13.50	13.31	0.85	0.62
20	32.14	32.14	7.32	6.12
30	50.75	50.63	27.60	23.87
40	74.80	60.43	66.12	52.29
50	123.25	74.57	166.92	117.65

5 结束语

针对 T-ACA 在动态环境路径寻优的过程中的局限性, 本文对 T-ACA 进行了相应的改进, 并以实际的区域交通规划背景为切入点, 提出了局部信息动态路径规划的改进蚁群算法, 所提出的 LD-ACA 在保证与 T-ACA 具有相当的优化效果的同时, 能够有效适应障碍变化、大大提高了路径规划的收敛速度。与此同时, 对 LD-ACA 在最优局部目标点选择和局部信息获取两个方面进行了优化, 优化方法在保证蚂蚁种群数目和迭代次数没有大幅增加的前提下, 大幅度地优化了寻优指标。

参考文献:

[1] 赵开新, 魏勇, 王东署. 改进蚁群算法在移动机器人路径规划中的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (11): 67-70.
 [2] 刘营营. 基于模糊神经网络的移动机器人路径规划研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.

(上接第 129 页)

[3] 柏 砾, 赵刚要. 基于 MapReduce 与蚁群优化的航路规划算法 [J]. 计算机工程, 2015, 41 (5): 38-44.
 [4] 赵娟平, 高宪文, 刘金刚, 等. 移动机器人路径规划的参数模糊自适应窗口蚁群优化算法 [J]. 控制与决策, 2011, 26 (7): 1096-1100.
 [5] 袁亚博, 刘 羿, 吴 斌. 改进蚁群算法求解最优路径问题 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52 (6): 8-12.
 [6] 基于遗传-模拟退火的蚁群算法求解 TSP 问题 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (3): 143-144.
 [7] 杨学峰. 蚁群算法求解 TSP 问题的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.
 [8] 宋代立, 张 洁. 蚁群算法求解混合流水车间分批调度问题 [J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19 (7): 1640-1647.
 [9] 周 鹏. 求解置换流水车间调度问题的混合蚁群算法 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45 (17): 191-193.
 [10] 屈 鸿, 黄利伟, 柯 星. 动态环境下基于改进蚁群算法的机器人路径规划研究 [J]. 电子科技大学学报, 2015 (2): 260-265.
 [11] 王 哲, 孙树栋, 曹飞翔. 动态环境下移动机器人路径规划的改进蚁群算法 [J]. 机械科学与技术, 2013 (1): 42-46.
 [12] 柳长安, 鄢小虎, 刘春阳, 等. 基于改进蚁群算法的移动机器人动态路径规划方法 [J]. 电子学报, 2011, 39 (5): 1220-1224.
 [13] Zhu Q, Hu J, Cai W, et al. A new robot navigation algorithm for dynamic unknown environments based on dynamic path re-computation and an improved scout ant algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11 (8): 4667-4676.
 [14] 葛延峰, 陈 涛, 孔祥勇, 等. 改进蚁群算法在城市汽车导航中的应用 [J]. 控制工程, 2016, 23 (1): 133-137.
 [15] 叶志伟, 郑肇葆. 蚁群算法中参数 α 、 β 、 ρ 设置的研究——以 TSP 问题为例 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2004, 29 (7): 597-601.

只采用了一种固定的四轮的结构, 没有研究万向轮的位置以及个数对平台的影响。在后续的实验总还需要对这几个方面进行更加全面的研究。

参考文献:

[1] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
 [2] 张忠将. SolidWorks 2014 机械设计完全实例教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
 [3] 刘 义. RecurDyn 多体动力学仿真基础应用与提高 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
 [4] 黄朝胜. 轮式车辆垂直障碍通过性研究 [J]. 中国机械工程, 2015 (9).
 [5] 屠德新, 魏道高, 蒋良生, 等. 基于 ADAMS 的车辆极限越障性能研究 [J]. 湖北汽车工业学院学报, 2010.
 [6] 程保山. 方向轮定位技术 [J]. 机器人技术与应用, 2009 (5): 35-37.
 [7] 祝晓才. 轮式移动机器人的运动控制 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
 [8] 史恩秀. 轮式移动机器人的运动控制及定位方法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
 [9] 王 薇. 轮式移动机器人的运动控制研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.
 [10] 焦晓娟, 张潜渭, 彭斌彬. RecurDyn 多体系统优化仿真技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.

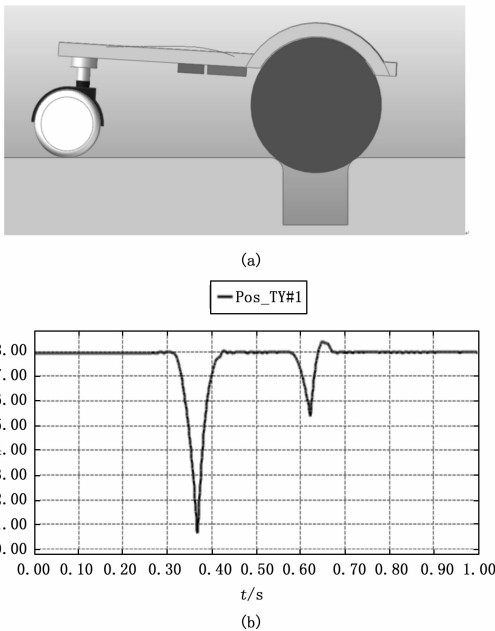


图 7 平台越障的仿真结果

仿真实验过程中考虑到了一部分实验条件, 但是还有一些并没有考虑到, 比如平台在砂土路面的行进情况。另外, 仿真