

新型巡检机器人移动底盘设计及越障性能分析

聂建军¹, 侯军凯¹, 解晓琳², 鄢鸿桢¹

(1. 中原工学院 机电学院, 郑州 450007; 2. 河南科技大学 农业装备工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 针对石化行业户外巡检工作设计了一款带有新型 H 型平衡摇臂机构的路面自适应巡检机器人移动底盘, 该底盘采用新型“4h”对称结构实现底盘的四轮驱动和转向操作。在介绍底盘总体结构的基础上, 分析了底盘驱动机构和转向机构的设计原理, 建立了底盘阿克曼 4WS 转向和原地转向的理论模型, 为机器人底盘运动控制提供了理论依据。对机器人底盘的单侧越障过程进行理论分析和仿真, 并与普通一体式底盘越障过程进行仿真对比, 研究了越障过程中底盘的行驶稳定性。最后, 进行了底盘样机的转向模式实验和单侧越障实验, 结果表明: 该移动底盘能够实现驱动和转向模式的切换, 在进行单侧越障时底盘运动姿态平稳, 具有良好的路面自适应能力和越障性能。

关键词: 车辆工程; 移动机器人; 底盘; 阿克曼转向; 原地转向; 越障性能

中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)02-0356-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221184

Design and obstacle surmounting performance analysis of a novel mobile chassis for inspection robot

NIE Jian-jun¹, HOU Jun-kai¹, XIE Xiao-lin², YAN Hong-zhen¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: A new type of mobile chassis with H-type balancing rocker mechanism for road adaptive inspection robot is designed for outdoor inspection in the petrochemical industry, which adopts a new “4h” symmetrical structure to realize four-wheel drive and steering operation of the chassis. Based on the introduction of the overall structure of the chassis, the design principles of the chassis drive mechanism and steering mechanism are analyzed, and the theoretical models of the chassis Ackermann 4WS steering and in-situ steering are established to provide a theoretical basis for the motion control of the robot chassis. The theoretical analysis and simulation of the unilateral obstacle-surmounting process of the robot chassis were carried out, and the simulation comparison with the obstacle-surmounting process of the common integrated chassis was conducted to study the driving stability of the chassis during the obstacle-surmounting process. Finally, the steering mode experiment and unilateral obstacle surmounting experiment of the chassis prototype were conducted. The results show that the mobile chassis can realize

收稿日期: 2022-09-13.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51905154).

作者简介: 聂建军(1971-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 机械产品现代设计理论及方法和现代制造技术.

E-mail: jjnie311@163.com

the switching of drive and steering modes, and the chassis has a smooth motion attitude when conducting unilateral obstacle surmounting, with good road self-adaptive ability and obstacle surmounting performance.

Key words: vehicle engineering; mobile robot; chassis; Ackerman steering; in-situ steering; obstacle surmounting performance

0 引言

石化行业具有高温高压、易燃易爆的特点^[1],需要对设备进行定时巡检,及时排除安全隐患,确保其安全平稳运行^[2-4]。传统巡检方式是安排人工按时巡检,利用检测设备和个人工作经验判断设备的运行状况^[5],巡检质量和工作效率受巡检人员的工作经验、个人状态等主观因素和天气、地理环境等客观因素的制约,导致设备漏检、误检等失误情况时有发生^[6-8]。随着人工智能的发展,利用巡检机器人代替人工巡检成为一种发展趋势^[9],由巡检机器人执行巡检任务,针对性地解决巡检难题,有效提高巡检的效率和质量^[10,11]。

移动机器人的运动方式有轮式、履带式、腿式和混合式等^[12,13],而户外巡检机器人大多选择轮式移动底盘^[14],相比于其他运动方式,轮式结构移动能力强、结构简单,但是存在越障性能较差、对复杂路面适应能力不足等问题^[15,16]。针对此情况,本文在前期研究的基础上^[17],设计一款采用新型H型平衡摇臂机构的巡检机器人移动底盘,该H型平衡摇臂机构可以使底盘在不平整路面上行驶时具有良好的路面自适应能力,能够提升底盘单侧越障时的稳定性,使底盘具备较强的越障性能。同时,采用新型“4h”对称结构实现机器人底盘的行驶和转向,克服了原机器人底盘采用多级皮带传动的缺点,提高了传动效率和可靠性,避免了长期使用导致皮带磨损、断裂等影响机器人寿命的情况,同时,在保证越障能力的前提下,改进悬架结构,降低了机器人机构的复杂度。

1 移动底盘整体结构设计

1.1 移动底盘驱动机构和转向机构设计

底盘驱动机构主要由驱动电机、电机减速器、驱动减速箱、传动轴、直角转向箱、轮边传动箱以及车轮轴组成,如图1(a)所示。

驱动电机作为整个底盘的动力源,经电机减速器和驱动减速箱将动力传递给传动轴,然后通过前、后轮处的直角转向箱和轮边传动箱实现两

次直角换向后到达前、后车轮轴,从而带动车轮转动。同侧前、后车轮采用同一根传动轴进行动力传递,动力传递部件相同,能保证前、后车轮转速相同。从底盘的俯视图看,整个动力的传递路线像个字母“h”,故称“h”型驱动机构。底盘左、右两侧各采用一套“h”型驱动机构,组成整个底盘的“2h”驱动机构,实现四轮驱动。

底盘转向机构主要由转向电机、电机减速器、转向减速箱、滚珠丝杠、丝杠螺母、导向杆、转向连杆、轮边传动箱等组成,如图1(b)所示。

转向电机输出的动力经电机减速器、转向减速箱传递给滚珠丝杠,由于丝杠螺母和导向杆固定连接,在导向杆的限制下丝杠螺母不能旋转,只能沿着丝杠做往复直线运动。丝杠螺母推动导向杆运动,而导向杆和轮边传动箱通过转向连杆连接,在转向连杆的作用下,车轮和轮边传动箱整体以转向轴为中心旋转一定的角度,即可实现转向操作。由于同侧车轮采用同一根滚珠丝杠,滚珠丝杠两端螺纹尺寸相同、但旋向相反,且前后车轮的导向杆、转向连杆和轮边传动箱完全相同,因此,当丝杠旋转时,两个丝杠螺母沿丝杠移动的距离相等、但方向相反,从而保证同侧前、后车轮转向时绕转向轴转动的角度相同、方向相反。从底盘俯视图看,整个转向机构像个字母“h”,故称为“h”型转向机构。两套“h”型转向机构共同组成底盘的“2h”转向机构,实现四轮转向。

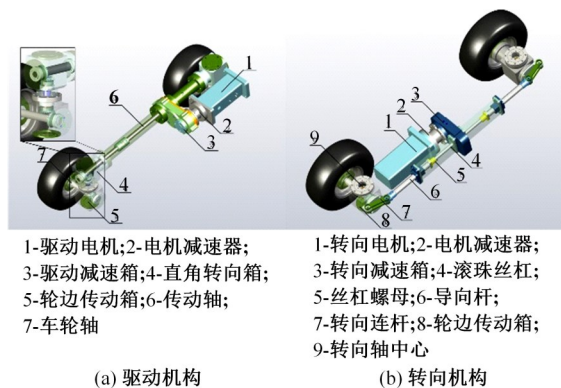


图1 驱动机构和转向机构设计

Fig. 1 Design of driving and steering mechanisms

1.2 移动底盘驱动机构和转向机构分析

1.2.1 移动底盘驱动机构理论分析

直角转向箱和轮边传动箱的传动比均为1,仅用于改变动力的传递方向,底盘两侧车轮的转速主要与驱动电机、电机减速器和驱动减速箱有关。设驱动电机的输出转速为 n_q ,电机减速器减速比为 i_1 ,驱动减速箱总减速比为 i_2 ,最终传递到车轮轴的转速为 n_w ,可以得出:

$$n_w = \frac{n_q}{i_1 i_2} \quad (1)$$

通过驱动器协调控制底盘两侧驱动电机的转速可以实现底盘的直线和转向行驶,同时双电机驱动可以极大提高底盘的负载能力和越障性能。

1.2.2 移动底盘转向机构理论分析

车轮向内旋转示意图如图2(a)所示, O 点为车轮转向时的旋转中心(转向轴中心线); C 点为车轮未转向时丝杠螺母的中间位置; B 点为转向杆和转向连杆的连接点; A 点为转向连杆和轮边传动箱的连接点。转向时,丝杠螺母在转向电机的作用下从 C 点向前移动到 C' 点,车轮和轮边传动箱以 O 点为中心向内旋转 α 角, B 点移动到 B' 点, A 点移动到 A' 点。 D 点为过点 O 做垂线与 BC 延长线的交点,由于机械结构的限制, B' 点位于 B 点与 D

点之间。 E 点、 E' 点分别为过 A 点、 A' 点做垂线与 BC 延长线的交点, θ 为 OD 与 OA 之间的夹角。

车轮向内旋转角度与丝杠螺母向前移动的距离之间存在一定的数学关系,可以用以下方程组表示:

$$\begin{cases} A'E' = OD - OA' \cos(\alpha + \theta) \\ E'D = OA' \sin(\alpha + \theta) \\ B'D = \sqrt{(A'B')^2 - (A'E')^2} - E'D \\ B'E = OA \sin \theta + B'D \\ BB' = \sqrt{(AB)^2 - (AE)^2} - B'E \end{cases} \quad (2)$$

由此可以得出:

$$BB' = OA [\sin(\alpha + \theta) - \sin \theta] - \sqrt{(AB)^2 - [OD - OA \cos(\alpha + \theta)]^2} + \sqrt{(AB)^2 - (AE)^2} \quad (3)$$

车轮向外旋转示意图如图2(b)所示,当丝杠螺母在转向电机的作用下从 C 点向后移动到 C'' 点,车轮和轮边传动箱以 O 点为中心向外旋转 β 角, B 点移动到 B'' 点, A 点移动到 A'' 点, E 点为过 A'' 点做垂线与 BC 的交点。

车轮向外旋转的角度和丝杠螺母向后移动的距离也存在一定的数学关系,可以建立以下方程组:

$$\begin{cases} DE = OA \sin \theta \\ DB = \sqrt{(AB)^2 - (AE)^2} - DE \\ BE'' = OA'' \sin(\beta - \theta) - DB \\ A''E'' = OD - OA'' \cos(\beta - \theta) \\ BB'' = \sqrt{(A''B'')^2 - (A''E'')^2} + BE'' \end{cases} \quad (4)$$

由此可以得出:

$$BB'' = OA [\sin(\beta - \theta) + \sin \theta] + \sqrt{(AB)^2 - [OD - OA \cos(\beta - \theta)]^2} - \sqrt{(AB)^2 - (AE)^2} \quad (5)$$

由于式(3)(5)中 AB 、 AE 、 OD 、 OA 、 θ 的值已知,规定车轮向内旋转和螺母向前移动为正方向即可确定车轮转动角度与丝杠螺母移动距离的关系。

1.3 移动底盘新型H型平衡摇臂机构

同侧“h”型驱动机构和“h”型转向机构组成该侧半车体,左、右半车体通过行星齿轮差速机构连接而成一个完整的底盘,如图3(a)所示。从底盘俯视图看,左、右半车体和行星齿轮差速机构组成字母“H”形,故称为新型H型平衡摇臂机构。

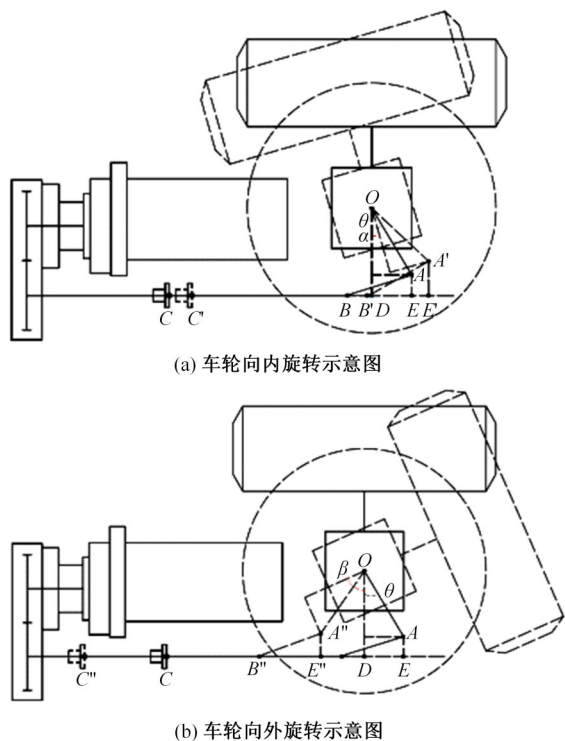


图2 车轮旋转示意图

Fig. 2 Diagram of wheel rotation

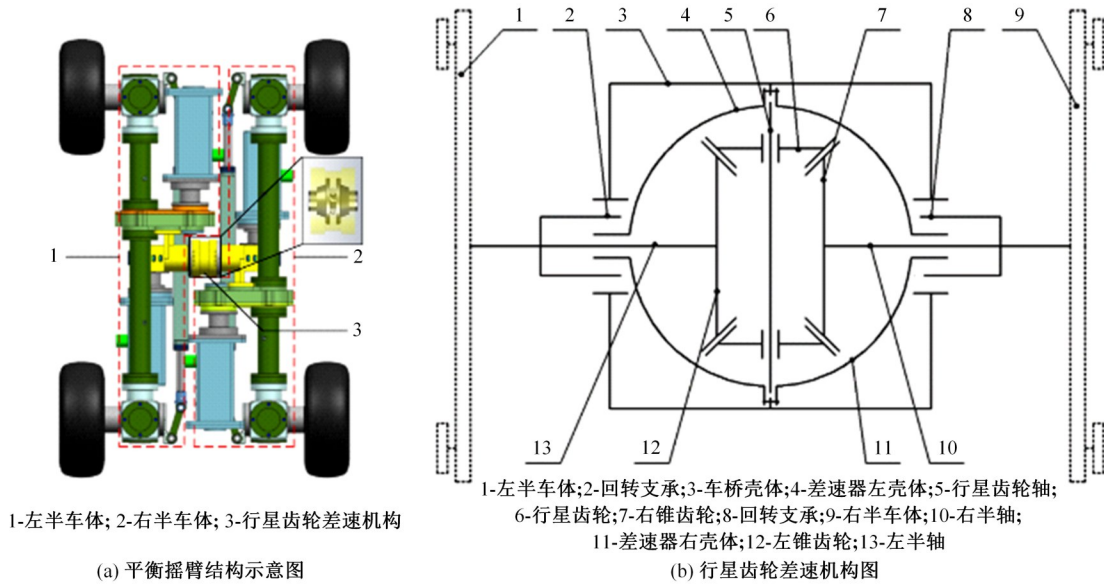


图 3 平衡摇臂结构示意图

Fig. 3 Diagram of the balance rocker arm structure

行星齿轮差速机构借鉴了汽车差速器和多轴汽车平衡悬架的原理,如图 3(b)所示,由回转支承、车桥壳体、行星齿轮、锥齿轮等零件组成。右前车轮遇到障碍物抬起,带动与之连接的右半车体、右半轴和右锥齿轮绕右半轴中心线旋转一定的角度,行星齿轮相对右锥齿轮逆向旋转,从而对左锥齿轮及其连接的左半车体产生一个与右半车体旋转方向相反的力,促使左前轮向下压紧路面。由于路面支撑,左半车体及左锥齿轮固定不动,则行星齿轮通过行星齿轮轴带动差速器左、右壳体及车桥壳体随右半车体旋转一定的角度,越过障碍物后,左、右车体恢复原状。由于防爆控制箱和检测装置等底盘上部装置通过空气弹簧和螺旋弹簧安装在左、右半车体上,右前轮抬起时,其他 3 个车轮紧贴路面,因此上部装置摆动幅度很小。

由于左、右半车体始终围绕行星齿轮差速机构做旋转运动,因此,H型平衡摇臂机构可以使底盘在复杂路况下越障时对其运动姿态进行实时调整,将底盘整体在越障过程中的摆动幅度限定在较小范围之内,减小底盘在不平整路面上发生侧翻的概率。

2 移动底盘转向模式分析

通过转向电机调节滚珠丝杠螺母的位置使车轮偏转一定的角度,结合“2h”驱动机构提供的整车动力,可以实现不同的转向模式。

2.1 阿克曼 4WS 转向模式

阿克曼 4WS 转向模式下,4 个车轮均可以转向。如图 4(a)所示,点 O 为底盘质心位置;点 O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 分别为车轮 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 的旋转中心; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 分别为转向过程中内侧前轮转角、内侧后轮转角、外侧前轮转角、外侧后轮转角;点 M 为转向过程中的理论转向中心; L 为前后车轮转向中心之间的距离; H 为左右车轮转向中心之间的距离; T 为转向中心到车轮胎面中心之间的距离。

为了便于分析,将图 4(a)的阿克曼 4WS 转向模型简化为如图 4(b)所示,图中, α 为底盘转向角度,其他符号同图 4(a)所示。

由于同侧前、后两个车轮转动角度相同,方向相反,故当底盘转向角度为 α 时,内、外两侧车轮转角满足以下关系:

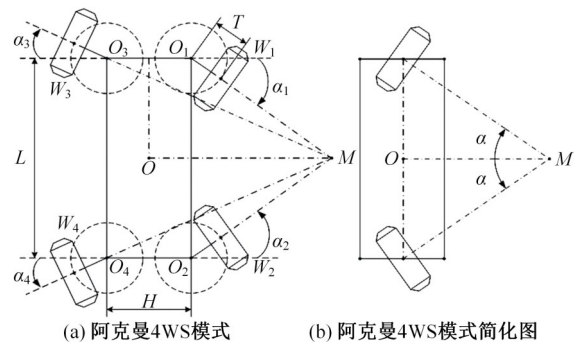


图 4 阿克曼 4WS 模式

Fig. 4 Ackerman 4WS mode

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_2 = \arctan\left(\frac{L \tan \alpha}{L - H \tan \alpha}\right) \\ \alpha_3 = \alpha_4 = \arctan\left(\frac{L \tan \alpha}{L + H \tan \alpha}\right) \end{cases} \quad (6)$$

忽略行驶过程中存在的车轮滑动,底盘在转向过程中四个车轮将围绕转向中心做圆周运动,内、外两侧车轮的转弯半径满足以下关系:

$$\begin{cases} S = \frac{0.5L}{\tan \alpha} \\ R = \sqrt{S^2 + (0.5L)^2} \\ R_{w_1} = R_{w_2} = \sqrt{(S - 0.5H)^2 + (0.5L)^2} - T \\ R_{w_3} = R_{w_4} = \sqrt{(S + 0.5H)^2 + (0.5L)^2} + T \end{cases} \quad (7)$$

式中: S 为点 O 与点 M 之间的距离, R 为4WS简化模型的转弯半径, R_{w_1} 、 R_{w_2} 、 R_{w_3} 、 R_{w_4} 分别为内侧前轮、内侧后轮、外侧前轮、外侧后轮的转弯半径。

在阿克曼4WS转向模式下,内、外两侧车轮的速度应根据转向角度的大小存在一定的轮速差,而车轮的转弯半径与转向角度满足式(7),并且两个驱动电机在行驶过程中转速相同,故轮速满足以下关系:

$$\begin{cases} V_{w_1} = V_{w_2} = \frac{\pi r n_w R_{w_1}}{30R} \\ V_{w_3} = V_{w_4} = \frac{\pi r n_w R_{w_3}}{30R} \\ K = \frac{V_{w_1}}{V_{w_3}} = \frac{V_{w_2}}{V_{w_4}} = \frac{R_{w_1}}{R_{w_3}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: r 为车轮半径; V_{w_1} 、 V_{w_2} 、 V_{w_3} 、 V_{w_4} 分别为内侧前轮、内侧后轮、外侧前轮、外侧后轮的轮速; K 为内、外两侧车轮速度的比值。

2.2 原地转向模式

通过转向电机将车轮转动到某一固定角度,底盘将围绕质心位置进行原地旋转,如图5所示。

原地转向模式下,内、外两侧车轮的转向角度满足以下关系:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \arctan(L/H) \quad (9)$$

内、外两侧车轮的转弯半径和行驶速度满足以下关系:

$$\begin{cases} R_{w_1} = R_{w_2} = R_{w_3} = R_{w_4} = \sqrt{(0.5H)^2 + (0.5L)^2} + T \\ V_{w_1} = V_{w_2} = V_{w_3} = V_{w_4} = \frac{\pi r n_w}{30} \end{cases} \quad (10)$$

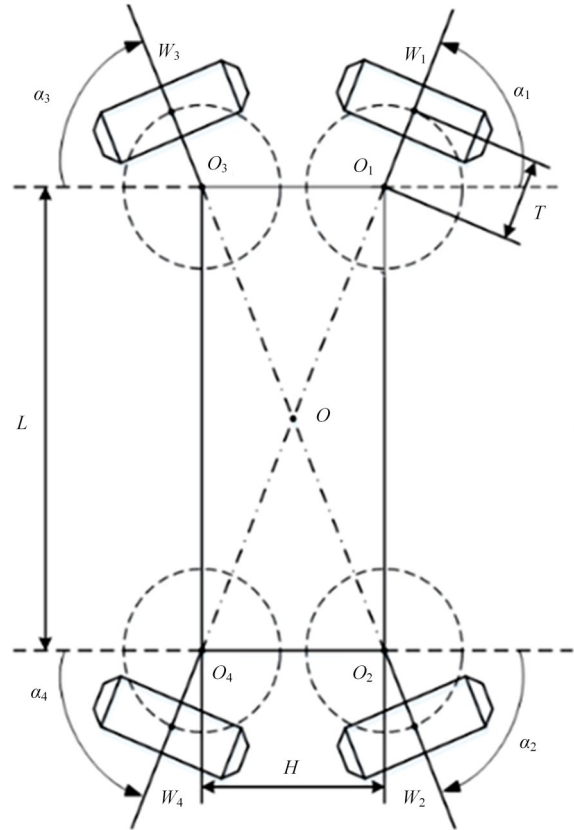


图5 原地转向模式

Fig. 5 Steering in place mode

3 移动底盘越障性能分析

3.1 移动底盘单侧越障理论分析

当带有平衡摇臂机构的底盘在行驶过程中单侧车轮遇到障碍物时,该侧前轮在驱动电机的作用下慢慢爬上障碍物,前轮位置随之升高,从而带动该侧半车体围绕行星齿轮差速机构的半轴中心线旋转一定的角度,而无障碍一侧的半车体与地面始终接近平行,围绕行星齿轮差速机构转动的角度很小,底盘在越障过程中4个车轮始终与地面接触,保证车轮驱动力,能够极大降低越过障碍的难度。

如图6所示,点 O 为后轮与地面的接触点, h 为越障高度, θ 为半车体旋转角度。底盘在单侧越障过程中,前轮带动该侧半车体以 O 点为支撑整体围绕行星齿轮差速机构旋转 θ 角,故满足以下关系:

$$\sin \theta = \frac{h}{L} \quad (11)$$

式中: L 为前后车轮转向中心之间的距离。

根据需要,可以通过合理设计前后车轮转向中心之间的距离 L 和允许的半车体旋转角度 θ 调

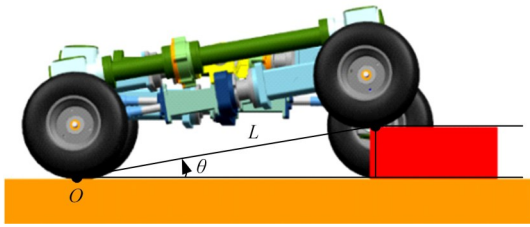


图 6 底盘越障时的右视图

Fig. 6 Right view of the chassis when surmounting obstacles

整底盘单侧越障时的最大越障高度,从而保证 4 个车轮始终与地面接触的情况下,使底盘满足越障能力和不平整路面上的自适应能力方面的不同要求,同时,平衡摇臂机构可以提高底盘对复杂路况的自适应能力,保证 4 个车轮始终与地面存在接触,提高行驶稳定性和越障能力。

3.2 移动底盘单侧越障仿真分析

对移动底盘单侧越障进行仿真分析时,需要对模型进行简化。本文利用三维建模软件将整个模型分为左半车体、右半车体、行星齿轮差速机构和车轮四个部分,在运动学仿真软件中给各部分添加定义和约束,并对其质量和材料进行设置,使底盘的质心位置与实际情况相符合,同时给 4 个车轮添加驱动和地面的 3D 接触,调整摩擦系数,对底盘单侧越障进行仿真。仿真时,将带有新型平衡摇臂机构的底盘与普通一体式底盘进行对比,分析两者的差异。

进行仿真时,设置的障碍物为长 370 mm、宽 390 mm、高 149 mm 的长方体块,当底盘正常行驶时,右侧半车体将会遇上障碍物,左侧半车体一直在平整路面上行驶,底盘完成越障,仿真结束。而

进行普通一体式底盘的单侧越障仿真时,需要禁止左、右半车体围绕行星齿轮差速机构的转动,真实模拟一体式底盘越障时的姿态,并对两者的仿真结果进行分析。

如图 7 所示,两种底盘分别通过单侧障碍时,带有新型平衡摇臂机构的底盘可以保证在通过障碍时,4 个车轮始终与路面接触,并会根据路面上出现的障碍自适应调整底盘姿态,提高行驶稳定性。而普通的一体式底盘在遇到障碍时,障碍物一侧的前轮能够慢慢爬上障碍物,但另一侧的前轮会出现悬空状态,导致底盘姿态处于不稳定状态。

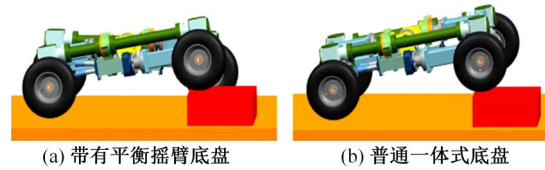


图 7 不同底盘单侧越障时车身姿态

Fig. 7 Body posture when surmounting obstacles on one side of different chassis

图 8 分别为两种底盘单侧越障时 4 个车轮中心的 z 向位移曲线图,由图可知,带有平衡摇臂的底盘单侧越障过程中,右侧前轮遇上障碍物后 z 向位移开始增大,爬上障碍物后 z 向位移基本保持不变,越过障碍物后 z 向位移开始减小,右侧后轮中心的 z 向位移变化趋势与右侧前轮相同,而左侧车轮在底盘越障过程中始终沿水平路面行驶,车轮中心的 z 向位移基本不发生变化。普通的一体式底盘越障时,两侧前轮中心的 z 向位移同时增大,左侧前轮处于悬空状态,当右侧前轮爬

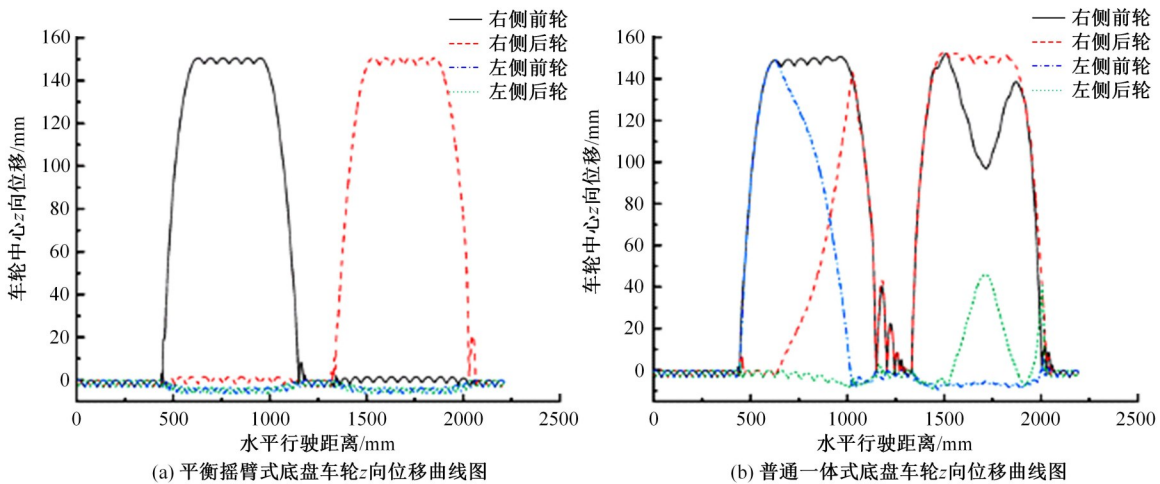


图 8 不同底盘车轮 z 向位移曲线图

Fig. 8 Wheel z-displacement curves for different chassis

上障碍物后,因底盘质量分布和惯性作用,左侧前轮开始下落, z 向位移减小,同时右侧后轮 z 向位移增大,开始离开地面,当右侧前轮越过障碍物后,右侧两个车轮 z 向位移减小,随后,右侧后轮遇到障碍,右侧两个车轮 z 向位移同时增大,等右侧后轮爬上障碍物后,右侧前轮和左侧后轮会发生上下摆动,最后底盘完成越障,4个车轮 z 向位移不再发生变化。

通过对比可以发现,带有摇臂机构的底盘越障时,半车体可以围绕中间行星齿轮差速机构转动,自适应地调整底盘姿态,保证整个越障过程中4个车轮时刻与地面接触,使底盘受到的地面障碍物的冲击显著减少,车轮的 z 向位移波动较小,提高了行驶稳定性。而普通的一体式底盘越障时,会出现两个前轮同时抬起、无障碍一侧的车轮悬空的情况,甚至会出现两个对角车轮同时悬空致使底盘整体摆动的情况,另外,越过障碍物后,底盘会受到地面的强烈冲击,车轮 z 向位移出现大的波动,底盘处于不稳定状态,行驶的平稳性也显著降低。

图9分别为两种底盘单侧越障时底盘质心 z 向位移对比、侧倾角度对比和俯仰角度对比。从图9(a)可知,越障过程中,平衡摇臂式底盘的质心 z 向位移远低于普通一体式底盘,两种底盘 z 向位移的峰值相差39.1 mm,并且平衡摇臂式底盘质心 z 向位移的变化较为平缓,在车轮越过障碍后落地时,质心 z 向位移变化不会像一体式底盘出现大范围波动。从图9(b)(c)可知,在越障过程中,平衡摇臂式底盘的侧倾角度和俯仰角度也远低于普通一体式底盘,两种底盘侧倾角度峰值相差 6.87° ,俯仰角度峰值相差 8.44° ,而且当底盘爬上障碍物后,平衡摇臂式底盘的侧倾角度和俯仰角度基本保持稳定,越过障碍后角度变化也相对平缓,但一体式底盘在爬上障碍物后,侧倾角度和俯仰角度会出现较大范围的波动,越过障碍物后受到地面的冲击,导致角度在短时间内发生多次变化。

通过以上分析可以发现,具有平衡摇臂机构的移动底盘在越障过程中,通过半车体围绕行星齿轮差速机构旋转的方式实现了对路面的自适应调整,能够保证四个车轮始终与地面接触,与普通一体式底盘相比,底盘的质心 z 向位移、侧倾角度和俯仰角度在越障过程中不会出现大范围的波

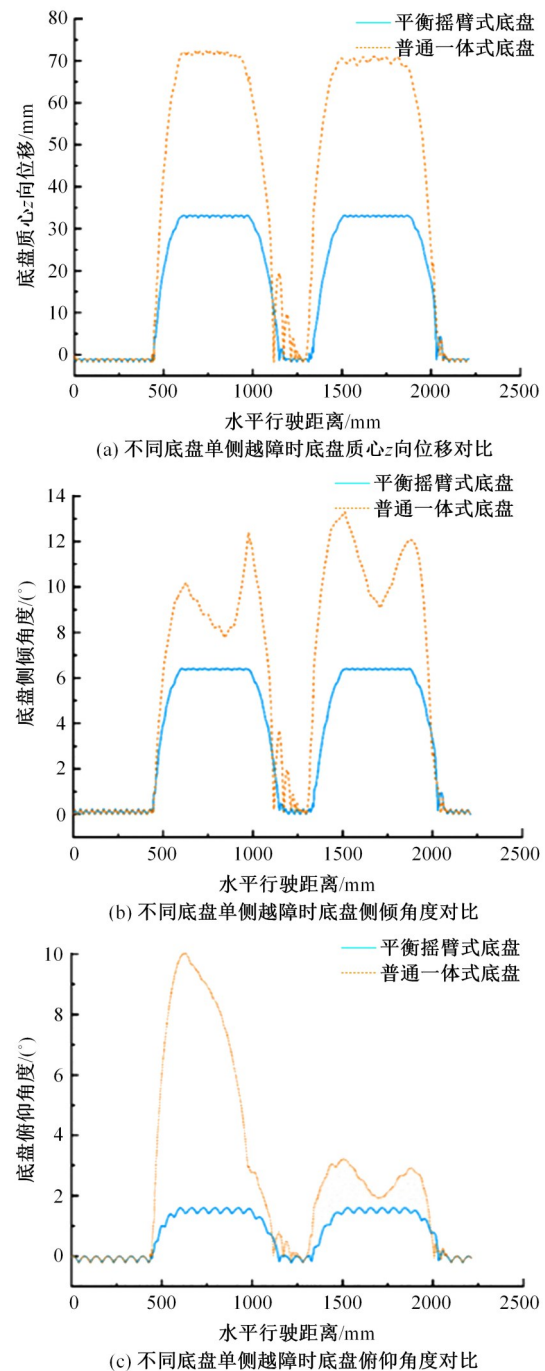


图9 不同底盘性能仿真对比

Fig. 9 Simulation comparison of different chassis performance

动,落地时受到的地面冲击减轻,极大提高了底盘的行驶稳定性和越障能力。

4 移动底盘的试制及实验

4.1 样机基本参数

根据移动底盘的设计计算及分析,进行了样机的试制,底盘的主要参数如表1所示。

表1 移动底盘基本参数

Table 1 Basic parameters of mobile chassis

序号	名称	参数
1	整车质量/kg	260
2	整车尺寸/mm	1170×750×400
3	最大爬坡度/(°)	15
4	最小越障高度/mm	50
5	驱动电机功率/kW	0.4
6	转向电机功率/kW	0.2
7	车轮半径/mm	155

4.2 实验结果分析

为验证理论分析结果和越障仿真实验的正确性,对移动底盘进行转向性能实验和越障实验,如图10所示,其中,图10(a)为装载了激光云台和防爆箱的完整样机,图10(b)所示的图片分别对应底盘的阿克曼4WS转向模式和原地转向模式,表2为底盘各个转向模式下的车轮转角,图10(c)为底盘样机进行单侧越障实验的过程图。

实验结果表明,底盘在进行转向时,内外两侧车轮的实际转角和理论转角基本一致,并且在围绕同一个转动中心做纯滚动运动,转向操作更加

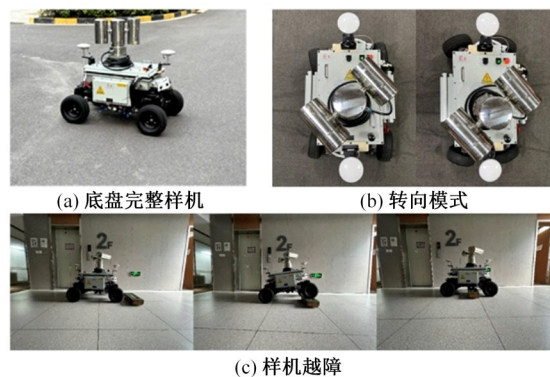


图10 样机实验

Fig. 10 Prototype experiment

灵活。图10(c)底盘进行单侧越障实验时障碍物为一块长方体木块,高度为120 mm,底盘左侧车轮沿路面正常行驶,右侧车轮尝试越过障碍物。越障过程中,右侧半车体围绕中间行星齿轮差速机构旋转一定角度,左侧半车体保持正常行驶,能保证每个车轮都与地面存在接触,使底盘能平稳越过障碍物,故新型H型平衡摇臂机构显著提升了底盘的越障能力和姿态平衡能力。

表2 不同转向模式下对应车轮转角验证结果

Table 2 Validation results of corresponding wheel angles under different steering modes

运行条件		理论转角/(°)		实际转角/(°)	
转向模式	底盘转向角度/(°)	内侧车轮	外侧车轮	内侧车轮	外侧车轮
阿克曼4WS转向	10	10.73	9.36	10.53	9.66
原地转向	—	68.43	68.43	68.66	68.06

5 结论

(1)针对石化行业户外巡检工作,设计了一种带有新型H型平衡摇臂机构的移动底盘,并且采用了新型“4h”对称结构,即“2h”驱动机构和“2h”转向机构。通过对转向机构及其转向模式的理论分析表明,该底盘能实现阿克曼4WS转向和原地转向两种转向模式,理论分析结果能作为底盘运动控制的理论依据。

(2)对新型H型平衡摇臂机构进行了理论分析,并对带有平衡摇臂机构底盘的单侧越障过程进行了仿真,与普通一体式底盘单侧越障过程进行了仿真对比,结果表明,带有新型H型平衡摇臂机构的底盘在通过障碍物时姿态稳定,整个过程更加平稳,对不平整路面有一定的自适应调节能力。

(3)本文研究完成了底盘样机的试制,进行了样机的转向模式实验和越障实验,实验结果表明,

所设计的驱动机构和转向机构能完成底盘驱动和转向模式的切换,且在平衡摇臂机构的作用下,底盘能顺利越过障碍物,并保持车身姿态稳定,表现出较强的越障性能和路面自适应能力。

参考文献:

- [1] 王燕,索寒生,贾贵金. 石化危险事故搜救移动机器人SLAM问题研究[J]. 控制工程, 2018, 25(2): 346-351.
Wang Yan, Suo Han-sheng, Jia Gui-jin. Research on SLAM problem of search and rescue mobile robot for petrochemical dangerous accidents[J]. Control Engineering, 2018, 25(2): 346-351.
- [2] 李军伟,朱宇昌,张树生,等. 输油场站巡检机器人系统及软件设计[J]. 制造业自动化, 2019, 41(2): 97-100.
Li Jun-wei, Zhu Yu-chang, Zhang Shu-sheng, et al. Robot system and software design for oil station inspection[J]. Manufacturing Automation, 2019,

- 41(2): 97-100.
- [3] 童泉军, 陈洋, 路浩, 等. 面向表计读数的变电站巡检机器人路径规划[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 167-177.
Tong Xiao-jun, Chen Yang, Lu Hao, et al. Path planning of substation inspection robot for meter reading[J]. Journal of Electronic Measurement and Instruments, 2022, 36(8): 167-177.
- [4] Xiao Y, Yan Y, Yu Y S, et al. Research on pose adaptive correction method of indoor rail mounted inspection robot in GIS Substation[J]. Energy Reports, 2022, 8(6): 696-705.
- [5] 鲁守银, 张营, 李建祥, 等. 移动机器人在高压变电站中的应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 276-284.
Lu Shou-yin, Zhang Ying, Li Jian-xiang, et al. Application of mobile robots in high-voltage substations[J]. High Voltage Technology, 2017, 43(1): 276-284.
- [6] 汪鹏. 变电站巡检机器人系统结构设计与控制研究[D]. 合肥: 安徽大学电气工程与自动化学院, 2020.
Wang Peng. Research on structure design and control of substation inspection robot system[D]. Hefei: School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, 2020.
- [7] 李战东, 陶建国, 罗阳, 等. 核电水池推力附着机器人系统设计[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2018, 48(6): 1820-1826.
Li Zhan-dong, Tao Jian-guo, Luo Yang, et al. Design of a nuclear power pool thrust-attached robot system[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(6): 1820-1826.
- [8] Jing G Q, Qin X Y, Wang H Y, et al. Developments, challenges, and perspectives of railway inspection robots[J]. Automation in Construction, 2022, 138: 104242-104266.
- [9] 杨智勇, 吴功平, 王伟, 等. 高压巡检机器人下坡节能控速方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2017, 47(2): 567-576.
Yang Zhi-yong, Wu Gong-ping, Wang Wei, et al. Downhill energy saving speed control method for high voltage inspection robot[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(2): 567-576.
- [10] 房立金, 祝帅, 贺长林, 等. 新型四臂巡检机器人结构设计及转向越障研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2019, 40(6): 825-830.
Fang Li-jin, Zhu Shuai, He Chang-lin, et al. Structural design of a new type of four-arm inspection robot and research on steering obstacle clearance[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 825-830.
- [11] 裴文良, 张树生, 李军伟. 矿用巡检机器人设计及其应用[J]. 制造业自动化, 2017, 39(2): 73-74.
Pei Wen-liang, Zhang Shu-sheng, Li Jun-wei. Design and application of mine inspection robot[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(2): 73-74.
- [12] 王成军, 王智慧. 井下巡检机器人浮动式移动底盘设计与分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(15): 25-30.
Wang Cheng-jun, Wang Zhi-hui. Design and analysis of floating mobile chassis of underground inspection robot[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2022, 50(15): 25-30.
- [13] 阴贺生, 张秋菊, 宁萌. 轮腿复合式变位越障机器人结构构型与典型运动过程分析[J]. 机械传动, 2017, 41(12): 1-6.
Yin He-sheng, Zhang Qiu-ju, Ning Meng. Structural configuration and typical motion process analysis of wheel-leg compound displacement obstacle crossing robot [J]. Mechanical Transmission, 2017, 41(12): 1-6.
- [14] 李荣, 栾贻青, 王海鹏, 等. 全向四驱变电站巡检机器人运动控制系统设计[J]. 机床与液压, 2020, 48(8): 112-116.
Li Rong, Luan Yi-qing, Wang Hai-peng, et al. Design of motion control system for omnidirectional four-wheel drive substation inspection robot[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2020, 48(8): 112-116.
- [15] 芮宏斌, 张森, 闫修鹏, 等. 全轮转向移动底盘设计及运动控制研究[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(9): 1352-1361.
Rui Hong-bin, Zhang Sen, Yan Xiu-peng, et al. Research on design and motion control of all-wheel steering mobile chassis[J]. Mechanical Science and Technology, 2022, 41(9): 1352-1361.
- [16] 姜涛, 葛少伟, 李德泉, 等. 电缆隧道巡检机器人行走机构的仿真研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2018(12): 68-71.
Jiang Tao, Ge Shao-wei, Li De-quan, et al. Simulation research on the walking mechanism of the cable tunnel inspection robot[J]. Automation and Instrumentation, 2018(12): 68-71.
- [17] 王鹏, 聂建军, 解晓琳, 等. 纯滚动轮式移动机器人设计及运动控制研究[J]. 机械传动, 2022, 46(8): 85-92.
Wang Peng, Nie Jian-jun, Xie Xiao-lin, et al. Research on the design and motion control of a pure rolling wheeled mobile robot[J]. Mechanical Transmission, 2022, 46(8): 85-92.